



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Johannes Meeder

Untersuchung, Optimierung und Analyse der Wirtschaftlichkeit von stützstrukturlosen „Arc Overhang“ Strukturen in der additiven Fertigung per Materialextusion

Johannes Meeder

**Untersuchung, Optimierung und Analyse
der Wirtschaftlichkeit von
stützstrukturlosen „Arc Overhang“
Strukturen in der additiven Fertigung per
Materialextrusion**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Telgkamp
Zweitprüfer: David Stachg

Abgabedatum: 12.11.2024

Zusammenfassung

Johannes Meeder

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung, Optimierung und Analyse der Wirtschaftlichkeit von stützstrukturlosen „Arc Overhang“ Strukturen in der additiven Fertigung per Materialextrusion

Stichworte

Arc Overhangs, waagerechte Überhänge ohne Supportstrukturen, 3D-Drucker

Kurzzusammenfassung

Die Bachelorarbeit zielt darauf ab, das Potential von Arc Overhangs in der additiven Fertigung zu ermitteln und erste Design-Grundlagen zu schaffen. Vor Beginn der experimentellen Arbeit wird eine umfassende Literaturrecherche zu den Themen Bahnplanung, Hatching und speziell Arc Overhangs in der additiven Fertigung durchgeführt, um einen ausführlichen theoretischen Hintergrund zu gewährleisten. Die Forschung an Arc Overhangs geschieht durch die Entwicklung einer Software-Lösung zur Erstellung von G-Code für Arc Overhang Strukturen und verschiedener Testkörper, an denen eine Parameterstudie durchgeführt wird, um den Einfluss auf die Qualität der gedruckten Teile zu analysieren. Das Screening der Parameter zielt darauf ab, die optimalen Parametersätze für verschiedene Anforderungs-Szenarien zu ermitteln. Mit dem Wissen, was mit dieser Technik machbar ist, kann zuletzt untersucht werden, welches Potential diese mit sich bringt und inwiefern das Konzept auch industriell und im größeren Rahmen genutzt werden kann.

Johannes Meeder

Title of the paper

Investigation, optimization and analysis of the economic efficiency of support-less “arc overhang” structures in additive manufacturing via material extrusion

Keywords

Arc Overhangs, supportless Printing, 3D-Printer

Abstract

The bachelor thesis aims to determine the potential of arc overhangs in additive manufacturing and to create initial design principles. Before starting the experimental work, a comprehensive literature search is conducted on the topics of path planning, hatching and especially arc overhangs in additive manufacturing in order to ensure a detailed theoretical background. The research on arc overhangs is carried out by developing a software solution for creating G-code for arc overhang structures and various test bodies on which a parameter study is performed in order to analyze the influence on the quality of the printed parts. The screening of the parameters aims to determine the optimal parameter sets for various requirement scenarios. With the knowledge of what is achievable with this technology, an evaluation can be made of the potential it offers and how the concept might be utilized on an industrial scale and in a broader context.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
1 Theorie und Internetrecherche	1
1.1 Freiheit in der Bauteilgestaltung	1
1.2 Überhänge	2
1.3 Aktueller Stand der Technik	2
1.3.1 Supports	4
1.3.2 Änderung der Druckorientierung	4
1.3.3 Modifizierte und spezielle Drucker	5
1.3.4 Änderung der Geometrie	8
1.4 Infill und Bahnplanung	9
1.5 Warping	10
1.6 Hilbert Kurve als Infill-Muster	11
1.7 Der Prozess vom Modell zum Druckobjekt	12
1.7.1 Erstellung und Export eines digitalen 3D-Modells	12
1.7.2 Importieren in einen Slicer	13
1.7.3 Erzeugung des G-Code	13
1.7.4 Start des Druckprozesses	13
1.8 Arc Overhangs	13
1.9 Implementierungen	14
1.9.1 Ursprung der Arc Overhangs	14
1.9.2 Implementierung in SuperPleccer	17
1.9.3 Implementierung als Post Processing Script	18
1.9.4 Grundlage der Bachelorarbeit	23
2 Praktischer Teil	24
2.1 Bestimmung von Prüfkörpern	24
2.1.1 Das gewählte Prüfobjekt	24
2.2 3D-Drucker und Equipment	25
2.3 Parameterstudie	25
2.4 Qualitätskriterien	26
2.4.1 Oberflächenqualität	26

2.4.2	Maßgenauigkeit	26
2.4.3	Verformungen und Warping	26
2.4.4	Schichthaftung.....	27
2.4.5	Artefakte	27
2.4.6	Wiederherstellung der Ebenheit nach Arc Overhangs	27
2.4.7	Druckzeit und Materialverbrauch	28
2.5	Einbindung von Methoden.....	28
2.6	Methoden aus dem Post Processing Script	28
2.7	Eigene Methoden.....	28
2.7.1	Druckpause zum Abkühlen	29
2.7.2	Mehrere Arc Layer übereinander	30
2.7.3	Anpassen der Druckgeschwindigkeit für zusätzliche Arc Layer	31
2.7.4	Einfügen von Pausen in zusätzliche Arc Layer	31
2.7.5	Hilbert Kurve mit alternierender Richtung.....	31
2.7.6	Kleinere Methoden	32
2.8	Softwarelösung	32
2.9	Vorstellung der Ergebnisse	33
2.9.1	V4.....	33
2.9.2	V12.....	35
2.9.3	V28.....	39
2.9.4	V35.....	41
2.9.5	V41	43
2.10	Erkenntnisse	45
3	Weitere Forschung und Zukunftsausblick.....	49
3.1	Alternative Prüfkörper	49
3.2	Alternative Drucker	51
3.3	Alternatives Filament	51
3.4	Alternative Druck-Arten	51
3.5	Alternative zur Parameterstudie.....	52
3.6	Alternative Methoden und Experimente.....	54
3.7	Alternative Designregeln	60
3.8	Modell zur Amortisationsberechnung von Arc Overhangs	62
3.8.1	Beispiel 1 – Hobbydruck des Prüfkörpers.....	64

3.8.2	Beispiel 2 – Hobbydruck eines Prüfkörper-ähnlichen Objekts.....	66
3.8.3	Beispiel 3 – Industriedruck eines Produkts.....	67
3.9	Analyse der Wirtschaftlichkeit	70
4	Auswertung und Fazit	72
4.1	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse.....	72
4.2	Analyse der Wirtschaftlichkeit	72
4.3	Fazit und Ausblick	72
5	Quellen	74

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
3MF	3D Manufacturing Format - Dateiformat für 3D-Modelle
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
CAD	Computer-Aided Design
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DoE	strategische Versuchsplanung (Design of Experiment)
FDM	Fused Deposition Modeling
G-Code	Geometrischer Code zur Steuerung des 3D-Druckers
h	Stunde
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde – Energieeinheit
mm	Millimeter
OBJ	Object - Dateiformat für 3D-Modelle
PLA	Polylactid (ein Filamenttyp für 3D-Druck)
PPS	Post Processing Script
PPPS	Post Post Processing Script
s	Sekunde
STL	Standard Tessellation Language - Dateiformat für 3D-Modelle
W	Watt – elektrische Leistungseinheit
WLAN	Wireless Local Area Network
ZHAW	Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften
°C	Grad Celsius
€	Euro

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich von additiver Fertigung mit anderen Fertigungsverfahren (in Anlehnung an [12])	1
Abbildung 2: Vergleich von verschiedenen Schichtdicken im 45 ° Überhang [26]	3
Abbildung 3: Reorientierung der Druckobjekte zur Vermeidung von extremen Überhängen (in Anlehnung an [42])	5
Abbildung 4: "RotBot" Drucker mit 45°-Druckdüse und zusätzlicher Rotationsachse [5]	6
Abbildung 5: 45° Neigung der Schichten im Querschnitt [15]	6
Abbildung 6: Delta-3D-Drucker mit einem neigbaren Druckbett [14]	7
Abbildung 7: Fließband-3D-Drucker [1]	8
Abbildung 8: Vermeidung von extremen Überhängen [42]	8
Abbildung 9: Verschiedene Infill-Muster im Vergleich (in Anlehnung an [3])	9
Abbildung 10: Verdeutlichte Darstellung der Wölbung eines Bauteils [40]	10
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Ursachen von Warping	11
Abbildung 12: Anwendung der Hilbert-Kurve als Infill-Muster im 3D-Druck [16]	12
Abbildung 13: Erste Versuche von McCulloch im Rahmen der xyz-Challenge [11]....	15
Abbildung 14: Bewusstes Rekreieren dieses Phänomens [11]	15
Abbildung 15: Drucken eines waagerechten Überhangs mit Arc Overhangs [11]	16
Abbildung 16: Python Programm, das eine beliebige Fläche mit Arc Overhangs füllen kann [11]	17
Abbildung 17: Aufruf des PPS beim Export des G-Codes	18
Abbildung 18: Vergleich verschiedener Werte für maximalen Arc-Radius - hier 10 mm	19
Abbildung 19: Vergleich verschiedener Werte für maximalen Arc-Radius - hier 20 mm	19
Abbildung 20: Demonstration von Wölbung bei langen Arcs (in Anlehnung an [41]) .	20
Abbildung 21: Wölbung des Teils von der Seite [41]	20
Abbildung 22: Verschachteltes Druckobjekt mit unlimitiertem Arc Radius	21
Abbildung 23: Gleiches Druckobjekt mit gedrosseltem Arc Radius = 10 mm	21
Abbildung 24: Druckobjekt ohne Offset der Arc-Mittelpunkte	22
Abbildung 25: Gleiches Druckobjekt mit Verschiebung der Mittelpunkte in die bereits gedruckte Fläche	22
Abbildung 26: Gewählter Prüfkörper für die Versuchsreihe	25
Abbildung 27: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven	34
Abbildung 28: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven	34
Abbildung 29: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven	34
Abbildung 30: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven	34
Abbildung 31: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven	35
Abbildung 32: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven	36
Abbildung 33: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven	36
Abbildung 34: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven	36
Abbildung 35: Direkter Vergleich der Oberflächenqualität von V11 und V12	37

Abbildung 36: Druckversuch V28 aus verschiedenen Perspektiven	39
Abbildung 37: Druckversuch V28 aus verschiedenen Perspektiven	39
Abbildung 38: Druckversuch V28 aus verschiedenen Perspektiven	39
Abbildung 39: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven	41
Abbildung 40: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven	41
Abbildung 41: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven	41
Abbildung 42: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven	42
Abbildung 43: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven	42
Abbildung 44: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven	43
Abbildung 45: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven	43
Abbildung 46: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven	43
Abbildung 47: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven	44
Abbildung 48: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven	44
Abbildung 49: Überhangsgeometrie mit Rundung, die an Arcs angepasst ist	47
Abbildung 50: Unangepasster Überhang ohne Rundung	47
Abbildung 51: Komplexe Überhangsgeometrie mit wechselnder Richtung des Überhangs	50
Abbildung 52: Versuchsraum bei der Veränderung von Temperatur und Druckgeschwindigkeit	53
Abbildung 53: Neue Form von Infill-Muster	55
Abbildung 54: Vergleich von Tree-Supports (links) und normalem Support (rechts)..	56
Abbildung 55: Druckkopf mit dünnerem Extruder für nicht-planare Druckschichten [4]	59
Abbildung 56: Einflüsse für Entscheidungsmodell	62
Abbildung 57: Beispieldruck 1 mit Supportmaterial.....	64
Abbildung 58: Druckbeispiel 2 mit Supportstrukturen	66

1 Theorie und Internetrecherche

1.1 Freiheit in der Bauteilgestaltung

Die Designfreiheit in der additiven Fertigung ist von entscheidender Bedeutung, da hier eine nahezu grenzenlose Gestaltungsvielfalt ermöglicht wird, die mit traditionellen Fertigungsverfahren nicht erreichbar ist. Anders als bei konventionellen Methoden, bei denen oft Einschränkungen durch Werkzeuge, Formen oder mechanische Bearbeitungsprozesse bestehen, erlaubt die additive Fertigung die Herstellung komplexer Geometrien und Strukturen ohne wesentlich höheren Aufwand oder Fertigungskosten. Diese Freiheit lässt mehr Kreativität in die Produktgestaltung einfließen, ermöglicht die Anpassung der Dichte bezüglich des Gewichts und Stabilität und reduziert gleichzeitig Materialverschwendung. Auch können Einzelanfertigungen und Produkte mit kleinen Losgrößen kosteneffizienter gefertigt werden, was besonders im Prototypenbau die Anpassungsgeschwindigkeit enorm erhöht. Auch individuell angepasste Endprodukte, Bauteile oder Werkzeuge sind deutlich schneller zu realisieren.

Die additive Fertigung setzt sich somit durch ihre Flexibilität und Anpassungsfähigkeit deutlich von herkömmlichen Fertigungsverfahren ab und treibt die Entwicklung in vielen Industriebereichen voran.

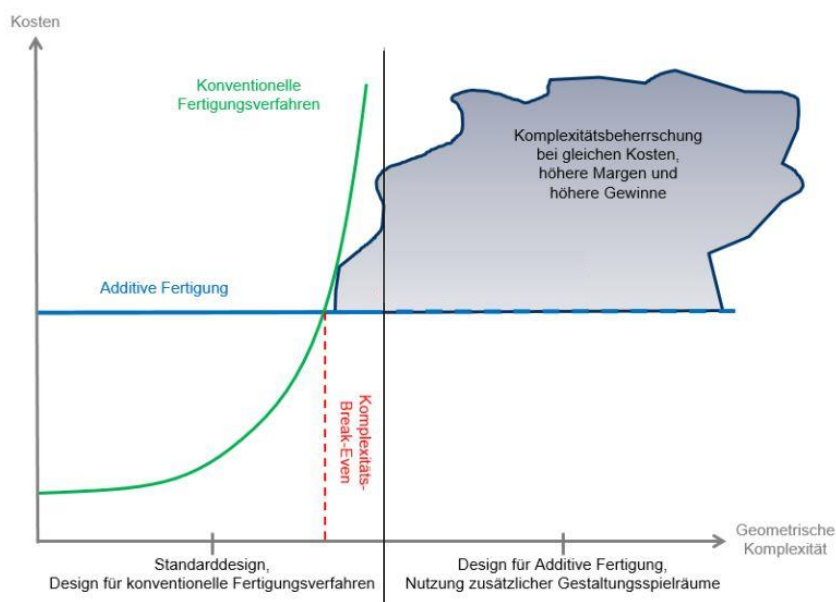


Abbildung 1: Vergleich von additiver Fertigung mit anderen Fertigungsverfahren (in Anlehnung an [13])

Diese Abbildung 1 zeigt die additive Fertigung (blauer waagerechte Linie) im Vergleich mit konventionellen Fertigungsverfahren (grüner Graph) in Bezug auf den Kostenaufwand bei gegebener geometrischer Komplexität. Eindeutig ist hier zu sehen, wie auch bei anspruchsvolleren Bauteilgeometrien die Kosten im 3D-Druck sich nicht stark verändern, wenn das Modellieren des Bauteils nicht mit einberechnet wird. Bei

konventionellen Herstellungsverfahren werden dafür jedoch häufig teurere Maschinen mit höherer Präzision, mehr Achsen und besonderen Werkzeugen gebraucht.

In dieser Arbeit ist die Dominanz der additiven Fertigung im Punkt Komplexität der Bauteilgeometrie besonders wichtig. Allerdings ist die Freiheit hier auch nur nahezu unbegrenzt. Neben Faktoren, wie Druckgröße, Materialauswahl, Druckgeschwindigkeit und Oberflächenqualität gibt es auch Einschränkungen in den Designregeln.

Eine dieser Einschränkungen ist das erschwerte Drucken von Überhängen.

1.2 Überhänge

Überhänge enthält jedes 3D-Modell, mit Oberflächen, die komplett oder auch nur teilweise zum Boden gerichtet sind. Das betrifft jedes Modell mit einer Fläche, deren Normalvektor eine Komponente in die negative Z-Richtung hat. Überhänge sorgen in manchen Fällen beim 3D-Druck für Probleme, da normalerweise keine Schicht gedruckt werden kann, die keine feste Fläche unter sich hat, auf die gedruckt werden kann. Der unterste Layer wird auf den Boden gedruckt und bei allen darauffolgenden Layern auf dem jeweils vorherigen. Bei Überhängen gibt es kein Material in der Ebene darunter und so muss in der Luft gedruckt werden. Das ist kein Problem, wenn nur kleine Bereiche gedruckt werden müssen, somit können auch problemlos Schrägen bis zu einem gewissen Grad ohne Probleme bewältigt werden. Wenn der zu überbrückende Bereich aber größer ist oder gar noch nicht mit dem eigentlichen Bauteil verbunden ist (Insel) fließt das flüssige Filament nach unten und wird dabei fest. Da das heiße Filament eine gewisse Viskosität hat, bleibt meist die „Plastikschnur“ am Extruder hängen und kann nach dem Aushärten zu fatalen Fehlern im restlichen Druck führen.

1.3 Aktueller Stand der Technik

Allgemein wird versucht, beim Drucken von Überhängen den Winkel von 45° nicht zu überschreiten. Dies ist ein Richtwert, der jedoch bei verschiedenen Druckern, Filamenten und Druckeinstellungen unterschiedlich ausfallen kann. Kleinere Distanzen und Flächen können auch in der Luft gedruckt werden, ansonsten wären Überhänge jeglicher Art ohne Supportmaterial nicht druckbar. Werden diese Flächen zu groß, fängt das flüssige Filament an, wegen der Schwerkraft in Richtung Druckbett abzusacken. Um das zu verhindern und somit eine bessere Oberflächenqualität beizubehalten, wird das Filament so schnell wie möglich abgekühlt, damit die Zeit, in der das Material herunterfließen kann, minimiert wird.

Das Material, mit dem gedruckt wird, unterscheidet sich zu Anderen in Eigenschaften wie der Aushärtungsgeschwindigkeit, dem Schmelzpunkt und der Viskosität beim Druck. In der Regel eignen sich Filamente wie PLA besser, da es schnell abkühlt und eine geringe Drucktemperatur benötigt. 190 °C bis 230 °C sind empfohlen für PLA, was um einiges kälter ist als die Empfehlungen für beispielsweise ABS mit 230 °C bis 260 °C.

Unabhängig vom Material wird auch empfohlen, mit einer Drucktemperatur am unteren Ende des empfohlenen Temperaturbereiches zu drucken, da dann die Kühlung des Druckers weniger Leistung erbringen muss. Das Filament kann schneller aushärten und neigt weniger dazu, sich nach unten zu verformen.

Ähnlich wie beim Senken der Düsentemperatur bietet auch das Senken der Druckgeschwindigkeit mehr Zeit zum Abkühlen des Kunststoffs. Gleichzeitig wird durch die langsame Durchflussrate sichergestellt, dass das Filament auch die Extrudertemperatur erreicht und dementsprechend kann die Drucktemperatur noch weiter abgesenkt werden.

Eine weitere relevante Einstellung zur Verbesserung des Drucks von Überhängen ist die Anpassung der Schichthöhe. Mit einer feineren Schichthöhe wird jeder Überhang auf mehr Schichten aufgeteilt, wodurch jede Schicht weniger übersteht, was das Durchhängen vermeidet. Als weiterer Vorteil kommt hinzu, dass sich die Oberflächenqualität verbessert, da weniger und nur kleinere Stufen zu sehen sind. Dickere Schichten hingegen sind steifer und widerstehen dem Durchhängen besser, selbst wenn sie weiter hervorragen. Zudem helfen sie manchmal, ein Wölben der Schichten zu verhindern, erfordern jedoch mehr Kühlung. Die optimale Schichthöhe sollte je nach Überhang und gewünschtem Ergebnis individuell angepasst werden.

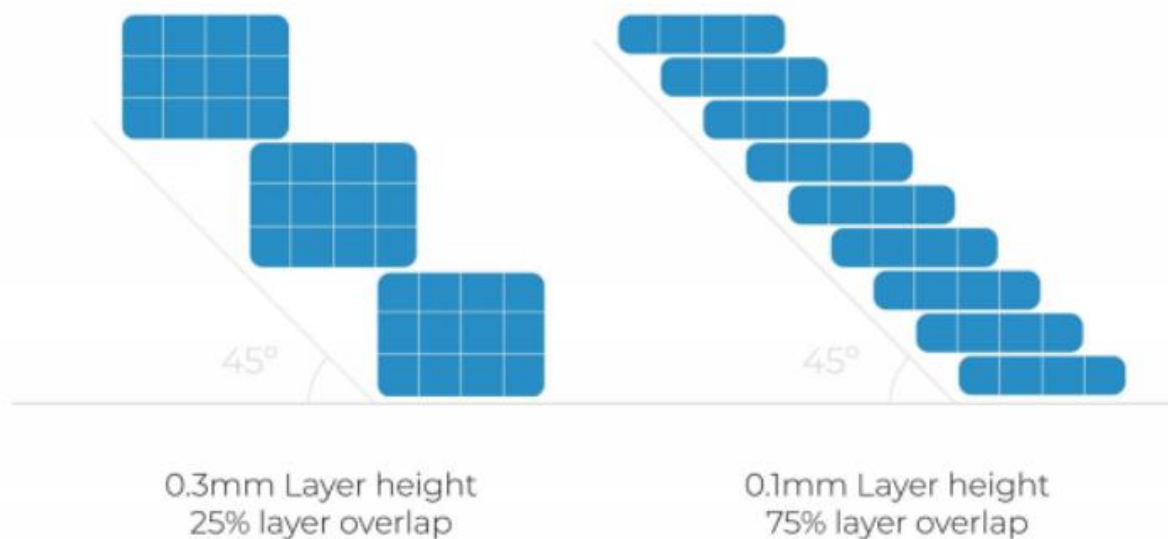


Abbildung 2: Vergleich von verschiedenen Schichtdicken im 45 ° Überhang [18]

In Abbildung 2 ist dieses Verhalten zur Veranschaulichung verdeutlicht. Es sind zwei Überhänge zu sehen, die einmal mit einer Schichtdicke von 0,3 Millimetern gedruckt wurde und der andere hat eine dreifach geringere Schichthöhe von 0,1 Millimetern. Im rechten Beispiel ist zu erkennen, dass zwar mehr Schichten für den Überhang benötigt werden, jedoch auch pro Ebene weniger Material in der Luft gedruckt werden muss.

Mit den genannten Guidelines konnte das Drucken von Überhängen schon so stark verbessert werden, dass die 45° als maximaler Überhangswinkel ohne Supportstrukturen häufig als ein wenig konservativ angesehen werden, da mit den richtigen Druckeinstellungen auch extremere Überhänge gedruckt werden können.

1.3.1 Supports

Die verbreitetste Lösung für das Problem ist wohl die Nutzung von Supportmaterial. Hierbei werden gitterartige Strukturen und Gerüste unter einen Überhang gedruckt, um diesen abzustützen. Um die Materialverschwendung zu minimieren, wird häufig darauf geachtet, dass dabei möglichst wenig Material genutzt wird, da diese Supportstrukturen bei der Nachbearbeitung des Drucks entfernt und weggeschmissen werden. Eine hohe Infilldichte zu wählen wäre hier verschwendet. Stattdessen liegt der Fokus auf Leichtigkeit, wenig Zeitverlust und eine gerade so ausreichende Stabilität. Dabei gibt es verschiedene Ausführungen von Supportstrukturen, die auch für mehr eingesetzt werden als nur zum Stabilisieren von Überhängen. Sie dienen etwa zur Verankerung des Bauteils auf der Druckplatte, können zur Wärmeableitung beitragen und können Verzug verhindern.

Stützgitter sind also eine gute Lösung für ein häufig auftretendes Problem, nachteilig sind aber der Materialverlust, der zusätzliche Zeitaufwand und ganz besonders der Nachbearbeitungsaufwand. Je nach dem, mit welchem Material gedruckt wird und wie die Supports gesetzt wurden, kann die Entfernung wenige Minuten dauern oder mehrere Arbeitsschritte und Stunden an Aufwand erfordern, was häufig einen Oberflächenqualitätsverlust mit sich bringt. Dazu kommt noch, dass in bestimmten Fällen gar keine Supportstrukturen gedruckt werden können, weil zum Beispiel das Bauteil zu verwinkelt ist oder die Decke eines hohlen Objektes gedruckt werden soll. Im zweiten Fall wären zwar theoretisch Supports möglich, jedoch gäbe es bei einem geschlossenen und hohlen Körper keine Möglichkeit, die Stützstrukturen zu entfernen.

1.3.2 Änderung der Druckorientierung

Es gibt neben den Supportstrukturen auch andere Möglichkeiten, Bauteile mit Überhängen zu drucken. Abhängig von der Geometrie des Druckobjektes besteht manchmal die Möglichkeit, die Druckrichtung zu ändern. Bei herkömmlichen Druckern würde das bedeuten, dass das Druckobjekt in einer anderen Orientierung auf dem Druckbett platziert wird. So kann ein waagerechter Überhang im Druckobjekt durch ein Kippen um 90° zu einer nahezu 2-dimensionalen Geometrie in X-Y-Ebene werden, die ohne Probleme gedruckt werden kann.

Abbildung 3 zeigt mehrere Beispiele dafür. Abgesehen davon, dass jeder dieser Buchstaben auch flach auf dem Druckbett gedruckt werden kann, die der Buchstabe H, sind auch andere Möglichkeiten gezeigt.

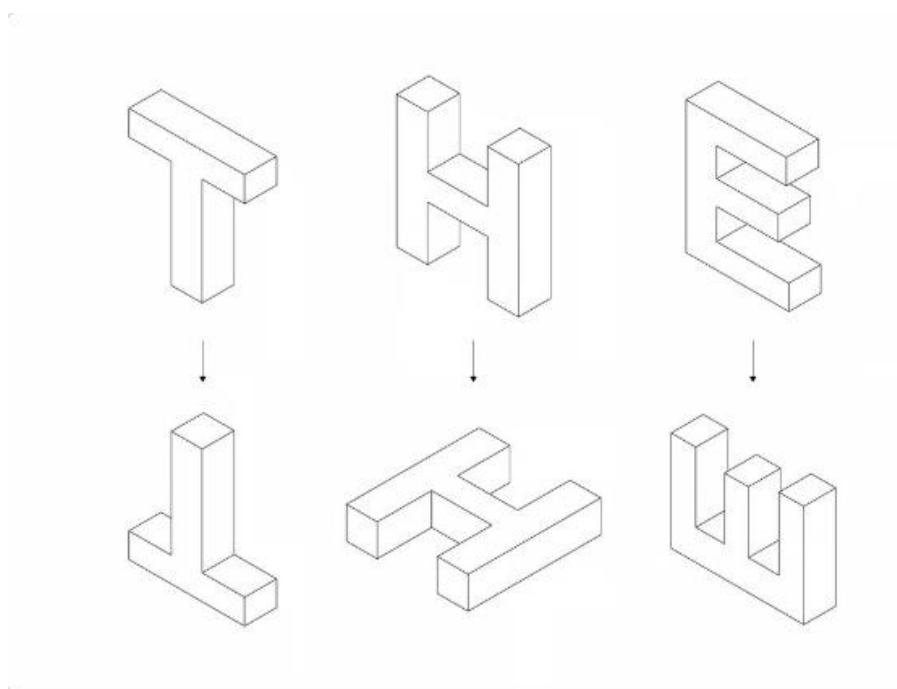


Abbildung 3: Reorientierung der Druckobjekte zur Vermeidung von extremen Überhängen (in Anlehnung an [44])

1.3.3 Modifizierte und spezielle Drucker

Anfang 2021 haben Forschende der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) einen herkömmlichen 3D-Drucker der Marke Prusa so umgebaut, dass der Extruder nicht mehr gerade nach unten druckt, sondern um 45° angewinkelt ist. Zusätzlich wurde noch eine weitere Achse hinzugefügt, mit der sich der Extruder um die Z-Achse drehen kann. Abbildung 4 zeigt ein Bild des Aufbaus. Somit sind die Schichten beim Drucker „RotBot“ nicht mehr planar in der X-Y-Ebene aufgebaut, sondern konisch, was zur Folge hat, dass nun Überhänge von 90° gedruckt werden können, ohne Supportstrukturen zu verwenden. Der Umbau benötigt jedoch einiges an Aufwand und gewisse Bauteile, die es noch nicht zu kaufen gibt.

Abbildung 5 zeigt den geänderten Aufbau der Schichten im Querschnitt. Die Schichten sind in einer 45° Neigung ausgerichtet zu der Mittelachse, von der aus die konischen Schichten von unten innen nach außen oben aufgebaut werden.

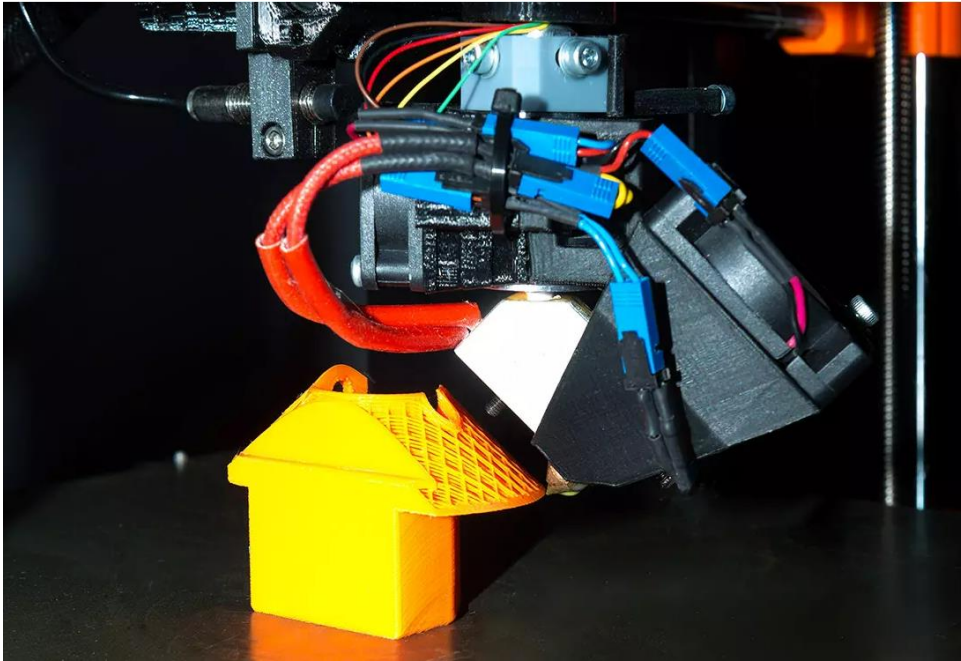


Abbildung 4: "RotBot" Drucker mit 45°-Druckdüse und zusätzlicher Rotationsachse [5]

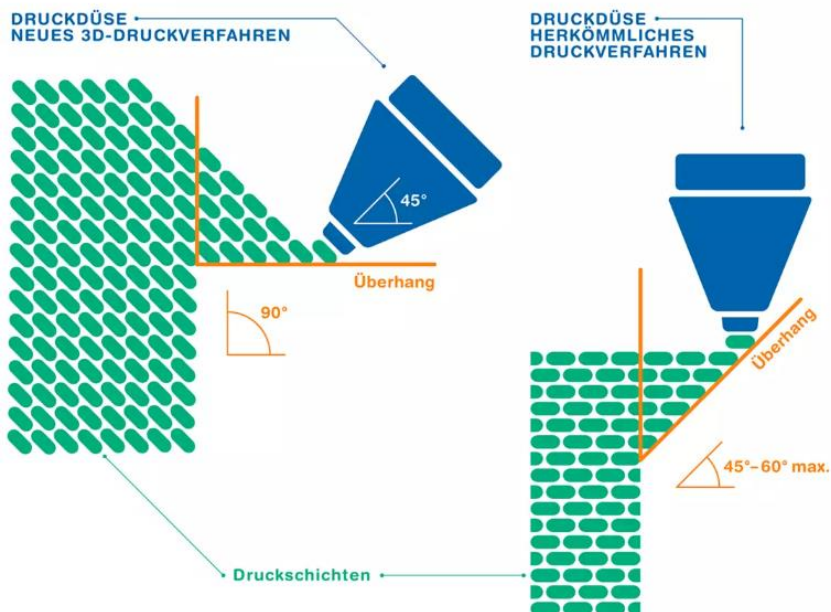


Abbildung 5: 45° Neigung der Schichten im Querschnitt [16]

Im Rahmen einer anderen Forschungsarbeit an der ZHAW haben zwei Masterstudenten einen Delta-3D-Drucker so umgebaut, dass sich neben dem Extruder, der sich in 3 Achsen bewegen kann auch noch das Druckbett in alle Richtungen bis zu einem gewissen Grad neigen kann, wie in Abbildung 6 gezeigt. So können ebenfalls große Überhänge gedruckt werden, die mit einem normalen kartesischen Drucker nicht möglich sind.



Abbildung 6: Delta-3D-Drucker mit einem neigbaren Druckbett [15]

Ein Belt-3D-Drucker ist eine Alternative, die schon jetzt herkömmlich erwerblich ist. Hierbei steht die Z-Achse im 45° Winkel zur Bodenplatte, was auch das Drucken von waagerechten Überhängen ermöglicht. Da jedoch der Druckkopf nicht rotieren kann und die Neigung der Z-Achse feststeht, verkleinert sich der Überhangswinkel in der anderen Richtung. Dieser Drucker kann also im Querschnitt nicht Überhänge von -45° bis $+45^\circ$ drucken, wie es bei den meisten Standard-Druckern der Fall ist, sondern nur einen Überhangsbereich von 0° bis 90° . Es können also nur Überhänge, in die eine Richtung gedruckt werden. Ein weiteres interessantes Alleinstellungsmerkmal ist das Druckbett, da hierfür ein bewegliches Fließband benutzt wird. Damit werden nahezu unbegrenzt große Drucke ermöglicht, sowie eine automatische Produktion in Serie, da die fertigen Teile sich selbst vom Fließband lösen. In Abbildung 7 ist ein solcher 3D-Drucker abgebildet.



Abbildung 7: Fließband-3D-Drucker [1]

1.3.4 Änderung der Geometrie

Die geringsten Probleme durch Überhänge entstehen natürlich, wenn sich keine im Druckobjekt befinden. Hierbei spielen Design Guidelines eine entscheidende Rolle, also Empfehlungen zu Winkeln und Geometrien, die ohne Stützstrukturen gedruckt werden können. Beispielsweise sollte bei Überhängen ein Winkel von maximal 45° nach Möglichkeit nicht überschritten werden, um stabilen Druck zu gewährleisten. Durch nur geringe Anpassung der Geometrie, wie die Integration von Schrägen anstatt waagerechten Flächen, kann die Druckqualität erhöht werden. So können Überhänge komplett vermieden werden oder mit wenig Aufwand gedruckt werden. Abbildung 8 zeigt hierfür ein Beispiel, bei dem ein waagerechtes Loch in einem Bauteil mit einem Torbogen entstehen soll. Die Rundungen beinhalten jedoch Überhänge von mehr als 45° , wo Druckfehler entstehen können. Je nach Anwendungsfall kann es also helfen, diese Rundung mit einer 45° -Schrägen zu ersetzen.

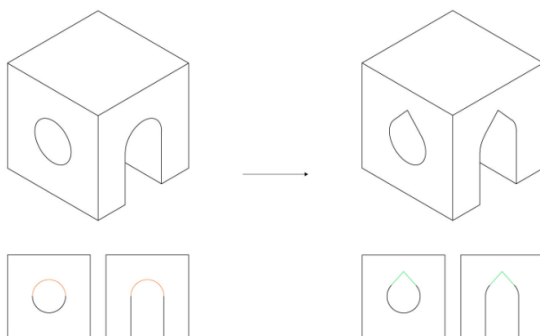


Abbildung 8: Vermeidung von extremen Überhängen [44]

1.4 Infill und Bahnplanung

Bei additiven Fertigungsverfahren ist eine weitere Besonderheit der innere Aufbau. Bei konventionell hergestellten Teilen kann man häufig nur entscheiden, ob das Bauteil hohl oder voll ausgefüllt sein soll. Im 3D-Druck ist auch alles dazwischen realisierbar. Der innere Aufbau eines Objektes wird Infill (auf Deutsch: Füllung) genannt. Dieser Begriff beschreibt in erster Linie die prozentuale Dichte, die das Druckobjekt abgesehen von den äußeren Wänden besitzt. Ein Teil mit 0 % Infill ist komplett hohl und ein Teil mit 100 % Infill ist komplett ausgefüllt (solid). Neben der Dichte gibt es weiterhin verschiedene Muster, die den Bauinnenraum definieren. Diese Muster bringen verschiedene Eigenschaften mit sich, unter anderem hohe Stabilität in unterschiedliche Belastungsrichtungen. Häufig wird das Infill-Muster in jeder zweiten Schicht um 60, 90 oder 180° gedreht gedruckt, um eine gleichmäßige Stabilität und Festigkeit in alle Richtungen zu gewährleisten und die Belastbarkeit des gedruckten Objekts zu erhöhen. In diesem Prozess entstehen zwischen den Schichten Berührungspunkte, die Querverbindungen zwischen zwei Layern darstellen. So hat das Infill-Muster nicht nur einen großen Einfluss auf die Stabilität in X- und Y-Richtung, sondern auch in die Z-Richtung.

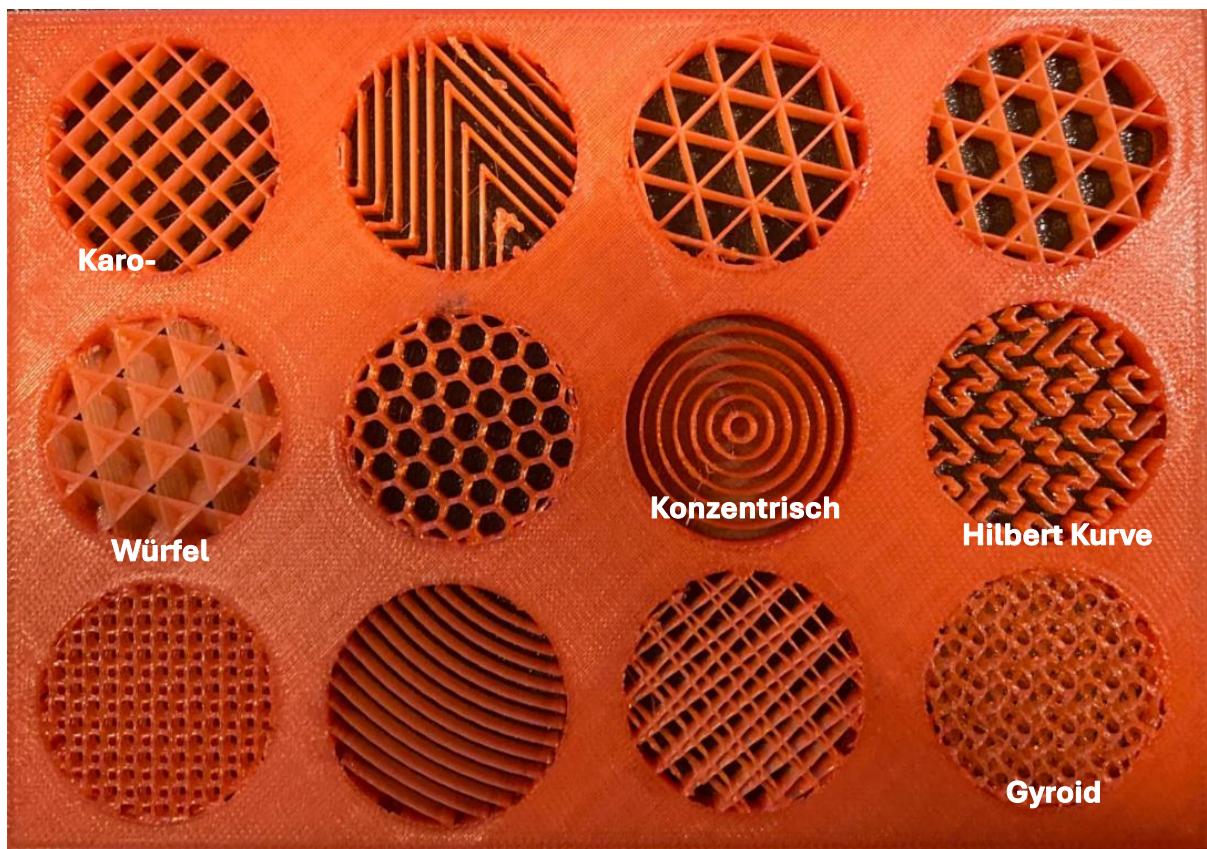


Abbildung 9: Verschiedene Infill-Muster im Vergleich (in Anlehnung an [3])

In der Abbildung 9 sind die gebräuchlichsten Muster beim 3D-Druck abgebildet. Das am häufigsten genutzte Infill-Muster ist das rechteckige „Karo-Muster“, das besonders für geringe Füllichten genutzt werden. Dabei werden im Wesentlichen parallele Linien gedruckt, wobei der Abstand der Linien von der Infill-Dichte abhängt. Für höhere Füllichten gibt es dreieckige Gitterstrukturen, welche die naturgemäße Stabilität der Dreiecke ausnutzen und damit schon bei mittelgeringen Füllichten eine hohe

Stabilität schaffen. Drucke, die in viele Richtungen stabil sein müssen, brauchen isotropere Eigenschaften als Vierecke, die schon bei einer Belastungsveränderung von 45° große Unterschiede aufweisen. Hier wird häufig eine Füllichte von 40 % oder höher genutzt. Dabei werden zum Beispiel Würfel oder Pyramiden als Füllung genutzt, die zueinander unterschiedlich geneigt sind. Ebenfalls gibt es das Gyroid-Pattern, das aus Wellenlinien besteht, die in jedem zweiten Layer um 90° gedreht sind und somit in viele verschiedene Richtungen stabil sind. Zuletzt gibt es noch besondere Füllmuster für flexible Drucke, die meist aus langen Linien ohne Querverbindungen oder innere Überschneidungen mit anderen Linien des Füllmusters bestehen, wie das konzentrische Muster aus Abbildung 9. Viele dieser Muster weisen lange und gerade Linien in eine Richtung auf, was bei kleineren Drucken kein Problem darstellt, jedoch bei großen und filigranen Objekten das Problem des Warping mit sich bringt.

1.5 Warping

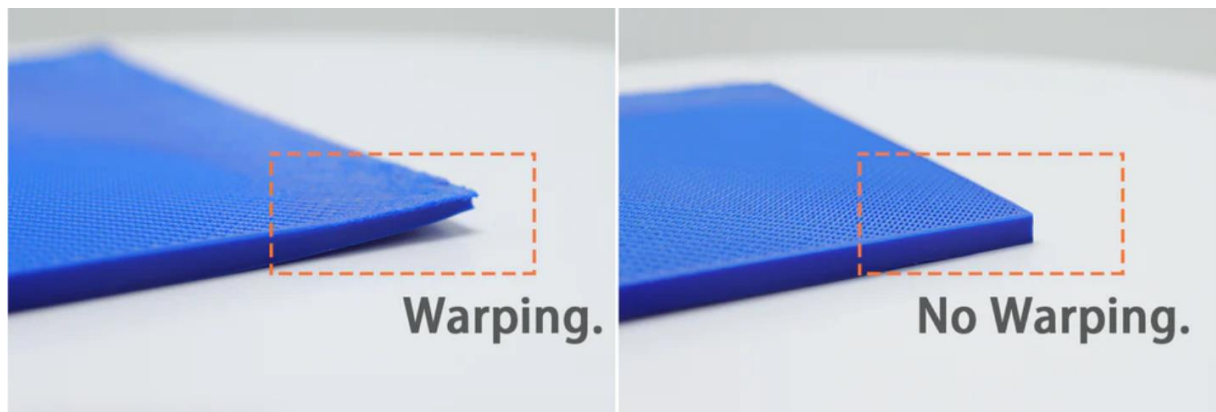


Abbildung 10: Verdeutlichte Darstellung der Wölbung eines Bauteils [42]

Warping (auf Deutsch: Wölben) beschreibt meist das Phänomen, dass sich die äußersten Ecken eines Querschnitts nach oben krümmen und somit die Bauteilgeometrie verändern, wie in Abbildung 10 verdeutlicht ist. Die Ursache hierfür ist oft das ungleichmäßige Abkühlen des Bauteils. Besonders bei großen oder langen Teilen ist die Temperaturkontrolle sehr wichtig und nicht einfach. Je nachdem, welches Druckmaterial genutzt wird, können beim Abkühlen der FDM-Filamente Schrumpfungen von bis zu 1 % auftauchen – Bei 30 cm Drucklänge sind das schon 3 mm, was sich dann in einer Wölbung bemerkbar macht. Bei großen Baustücken hat ein Layer viel Zeit, um abzukühlen. Wenn nun der erste Layer gedruckt wird und abkühlt, verkleinert sich die Geometrie. Als nächstes wird eine weitere Schicht mit der ursprünglichen Geometrie aufgetragen und verbindet diese mit der Schicht darunter. Beim Abkühlen der oberen Schicht kann die untere nicht mehr mitschrumpfen und so wird sie nach oben gewölbt, um der Kompression standzuhalten. Abbildung 11 zeigt dieses Phänomen im Querschnitt.

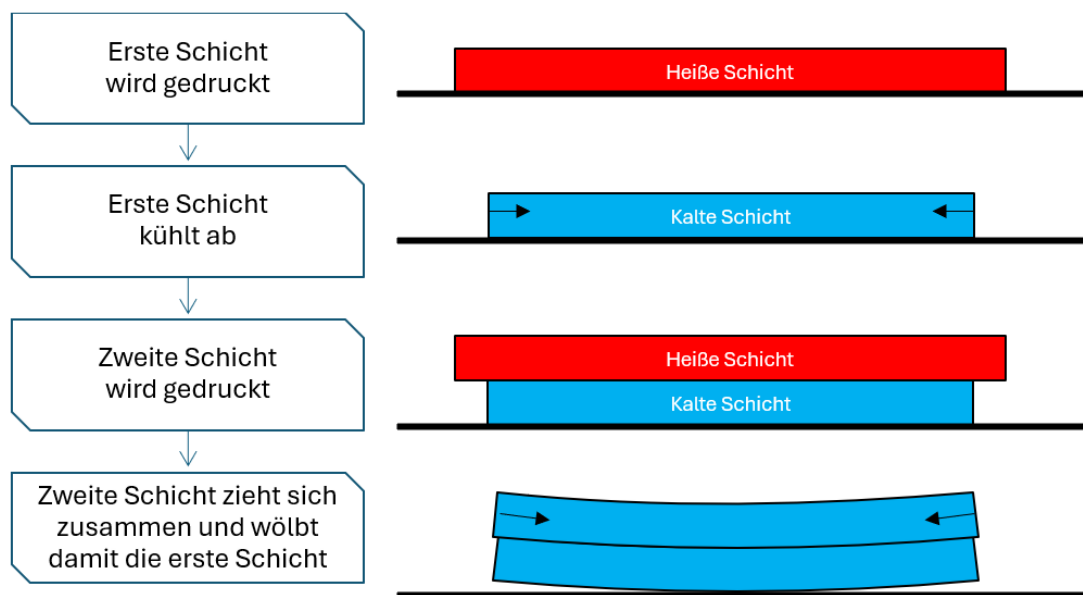


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Ursachen von Warping

Dieser Effekt verstärkt sich mit zusätzlichen Layern. Hier spielen auch die Infill-Muster eine Rolle. Das Warping tritt umso stärker auf, je mehr lange, durchgezogene und gerade Linien das Füllmuster hat, da diese sich absolut betrachtet stärker kontrahieren als kurze Linien. Auch gilt, dass höhere Füllichten für mehr Eigenspannung sorgen, da der beschriebene Effekt durch mehr Infill verstärkt wird.

1.6 Hilbert Kurve als Infill-Muster

Die Hilbert-Kurve ist ein fraktales Füllmuster, welches im 3D-Druck als Infill verwendet werden kann. Der Aufbau der Hilbert Kurve ist in Abbildung 12 zu erkennen. Die bessere Wärmeverteilung und gleichmäßigere Abkühlung beim Einsatz der Hilbert-Kurve als Infill-Muster resultieren aus der Art und Weise, wie die chronologische Abfolge der Druckbewegungen über die gesamte Druckfläche verteilt ist. So wird vorgebeugt, dass sich Bereiche in der Druckfläche schon abkühlen und fest werden, während der Rest der Ebene noch gedruckt wird. Weiterhin hat die Hilbert-Kurve den Vorteil, dass die gedruckten Linien kurz sind und sich nicht geradlinig über die gesamte Druckfläche erstrecken. In der Theorie wird damit das Problem der Wölbung reduziert, da sich die kurzen Elemente der Kurve weniger stark zusammenziehen können und diese Verformungen keine Spannungen auf die Außenwand übertragen. Andererseits ist auch mit einem Verlust der Widerstandsfähigkeit in X- und Y-Richtung zu rechnen.

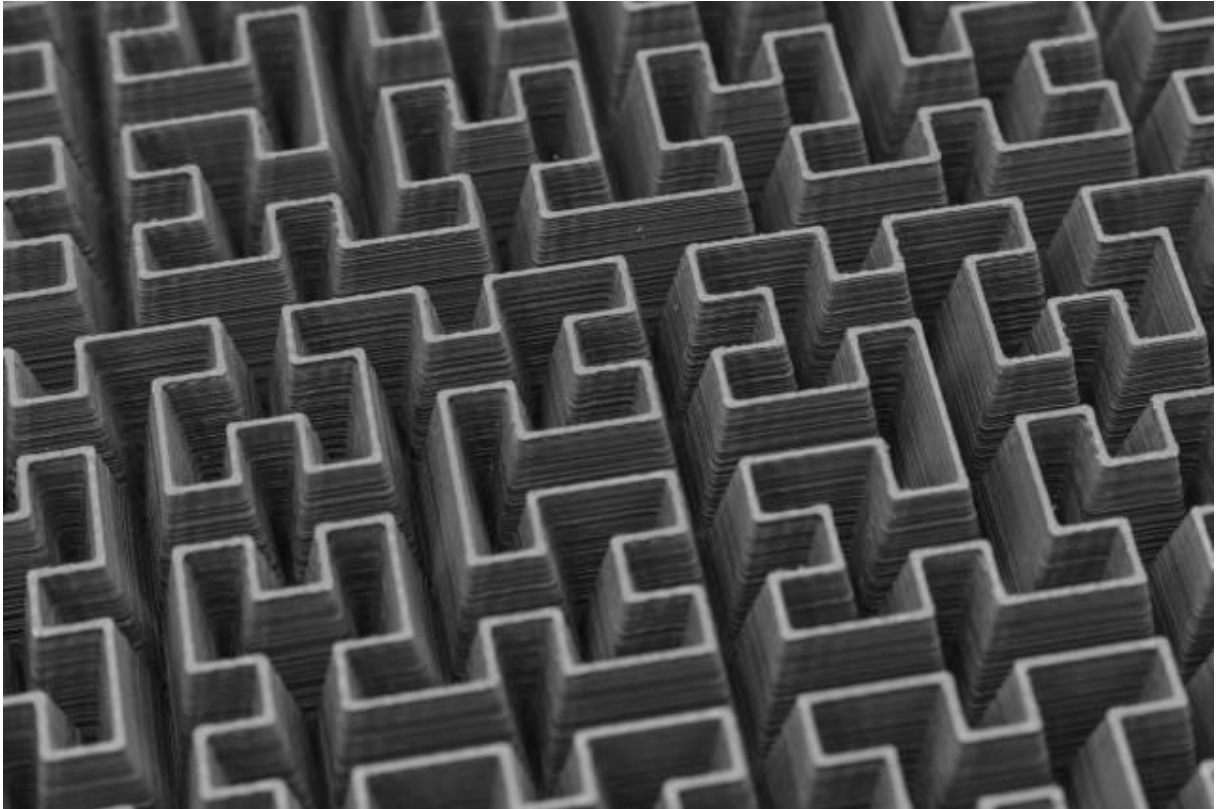


Abbildung 12: Anwendung der Hilbert-Kurve als Infill-Muster im 3D-Druck [17]

Hier ist anzumerken, dass nach einer ausgiebigen Recherche nur wenige Quellen auf dieses Thema eingehen, geschweige denn Nachweise oder Experimente aufzeigen, die dieses Phänomen bestätigen. Größtenteils ergeben sich die Ergebnisse aus Internetforen, wo einzelne Hobby-Drucker sich dieselbe Frage stellten und die Schlussfolgerungen aus wenigen Testdrucken geteilt haben.

1.7 Der Prozess vom Modell zum Druckobjekt

Die Prozesskette von einem digitalen 3D-Modell bis hin zu einem fertig gedruckten Teil umfasst einige Schritte, die für jeden Druck notwendig sind. Die folgende Aufzählung zeigt eine solche Abfolge und erläutert Begriffe, wie Slicer und G-Code, die in dieser Arbeit noch relevant werden.

1.7.1 Erstellung und Export eines digitalen 3D-Modells

Der erste Schritt in dieser Prozesskette ist die Erstellung des 3D-Modells. Dies erfolgt meist mit Hilfe einer CAD-Software oder durch das Herunterladen eines bereits existierenden Modells. Das Modell wird in Formaten wie STL, OBJ oder 3MF exportiert. Diese Dateien beschreiben die Oberfläche des Modells als Netz aus Dreiecken (Triangulation), ohne Informationen über das Material oder die Struktur im Inneren zu enthalten.

1.7.2 Importieren in einen Slicer

Im zweiten Schritt wird das digitale 3D-Modell in eine sogenannte Slicer-Software geladen. Der Slicer hat die Aufgabe, das Modell in viele horizontale Schichten (Layer) aufzuteilen, die der Drucker später nacheinander aufbauen wird. Im Slicer werden außerdem die Druckparameter festgelegt, die für den Druck verwendet werden. Neben vielen anderen Einstellungen können hier Schichthöhe, Infill, Druckgeschwindigkeit, Temperaturen und gegebenenfalls Supportstrukturen bestimmt werden.

Je nach Slicer gibt es auch fortgeschrittenere Variablen, mit denen der Druck noch feiner konfiguriert werden kann.

1.7.3 Erzeugung des G-Code

Nachdem alle Einstellungen festgelegt sind, erzeugt der Slicer den sogenannten G-Code. Der G-Code (kurz für geometrischer Code) ist die maschinenlesbare Sprache, die dem 3D-Drucker präzise Anweisungen und die Bahnplanung gibt. Er enthält eine Abfolge von Befehlen, die die Bewegung des Druckkopfes, die Extrusion des Materials, die Temperaturregelung und die Abfolge der Schichten steuern.

Ein typischer G-Code-Befehl sieht beispielsweise folgendermaßen aus:

```
G1 X50 Y25 Z11.25 E0.02 F1500
```

Das versteht der Drucker als: Bewege den Druckkopf zu den Koordinaten X=50, Y=25, Z=11.25 und extrudiere 0.02 mm Filament mit einer Geschwindigkeit von 1500 mm/min."

1.7.4 Start des Druckprozesses

Sobald der G-Code erstellt wurde, muss er an den 3D-Drucker per SD-Karte, USB-Stick, Kabel oder WLAN übermittelt werden. Zuletzt kann der Druck gestartet werden, bei dem der Drucker chronologisch die Befehle des G-Codes abarbeitet.

Es wird als erstes das Druckbett und der Extruder vorgeheizt und die Kalibrierung abgeschlossen, womit festgestellt wird, wo im Raum sich der Druckkopf befindet. Beim Drucken der ersten Schicht wird meist mit einer verringerten Druckgeschwindigkeit darauf geachtet, dass die Haftung auf dem Druckbett gewährleistet ist. Die nächsten Schichten basieren dann jeweils auf der darunter und so baut sich das Objekt Stück für Stück auf.

1.8 Arc Overhangs

Arc Overhangs bieten eine Möglichkeit, Überhänge von bis zu 90°, also komplett waagerechte Flächen zu drucken, ohne die Nutzung von Supportmaterial oder modifizierten Druckern.

Bei kleineren Überhängen und Überbrückungen wird das Material in der Luft gedruckt und kann nur halten, wenn es sich um sehr kleine Flächen handelt, die gedruckt werden. Arc Overhangs nutzen diese Technik auch, wobei aber nur genau eine Linie pro

Zeit in der Luft gedruckt wird, die jedoch eine größtmögliche Kontaktfläche zu dem festen Bauteil hat. Nachdem dieses gedruckte Stück abgekühlt ist, wird eine weitere Linie gedruckt, die direkt anliegend an die vorherige ist. Somit besteht viel Kontaktfläche und viel Halt, was wiederum das Drucken dieser Linie in der Luft ermöglicht. Und genau so geht es weiter, bis ein waagerechter Überhang entsteht, der ohne Arc Overhangs unmöglich druckbar wäre.

Eine weitere charakteristische Eigenschaft dieser Druckart ist die Form der Linien. Anstelle von geraden Linien, die nur eine höhere Stabilität gegenüber Kräften aufweisen, die senkrecht auf der Linie stehen oder der Linienrichtung folgen, werden konzentrische Kreisbögen gedruckt. Daher kommt auch der Name Arc Overhang (auf Deutsch: Bogen Überhang). Bögen können mit ihrer gekrümmten Form deutlich besser Widerstand gegen die herunterziehende Schwerkraft leisten. Beginnend bei einem Startpunkt, der am festen, schon gedruckten Teil des Objektes liegt, werden die Kreisbögen immer größer, bis die komplette überhängende Fläche mit den selbststützenden Bögen gefüllt ist. Wenn diese Fläche fertig gedruckt ist, kann sie als fester Layer genutzt werden, um die nächsten Schichten darauf zu drucken. Häufig bleibt es nicht nur bei einem Ursprung der Arcs, da bei genügend großem Radius und einem entsprechend kleinem Bogen die gedruckten Linien fast gerade sind, was wie beschrieben zu Instabilität führen kann. Wenn also eine Kette von Arcs einen bestimmten Radius erreicht, wird eine neue Kette mit einem Startpunkt begonnen, die auch wieder mit kleinen Kreisbögen startet, die immer größer werden. Das ermöglicht auch das Erreichen von scharfen Ecken in komplexeren Bauteilen.

Noch weitaus mehr Parameter und Einflüsse sind relevant für die Qualität und Stabilität der Arc Overhangs, die in dieser Arbeit erforscht und optimiert werden.

1.9 Implementierungen

Da das Konzept der Arc Overhangs ziemlich neu ist, ist dieser Funktion kein elementarer Bestandteil jeder Slicing Software und die Anwendung kann selbst für geübte Ingenieure mit Erfahrung im Bereich 3D-Druck eine Herausforderung sein.

1.9.1 Ursprung der Arc Overhangs

Die ursprüngliche Idee kommt von Steven McCulloch. Dieser entdeckte erstmals im Dezember 2022 dieses Phänomen im Rahmen der full-control XYZ-Challenge. Das ist ein Wettbewerb, bei dem online geteilt werden kann, auf welche Weisen man einen 3D-Drucker nutzen kann, wenn man nicht limitiert durch einen normalen Slicer ist. So testete McCulloch einige Drucke im Bezug auf Überhänge aus und stapelte mehrere dünne Scheiben verschoben zueinander übereinander. Dabei sollten diese Scheiben nicht normal gedruckt werden mit Konturlinien und Infill, wie es eine Slicing Software machen würde, sondern in einer spiralförmigen Bahn. Das hat den Zweck, dass das Material sich um sich selbst wickelt und somit den nötigen Halt aus der Verbindung mit dem jeweils inneren Bogen hat.



Abbildung 13: Erste Versuche von McCulloch im Rahmen der xyz-Challenge [11]

Wie in Abbildung 13 sichtbar ist, funktionierte das erstaunlich gut, was ihn auf die Idee brachte, dieses Phänomen bewusst zu rekreieren. Dafür druckte er einen Überhang, der aus genau einer solchen Scheibe besteht. Auf diese Scheibe druckte er im nächsten Layer eine weitere Scheibe, die ähnlich aufgebaut ist, aber den Mittelpunkt der Spirale an einem Endpunkt der darunterliegenden Scheibe hat. So ist eine feste Startfläche gegeben, auf der gedruckt werden kann. Das wird so lange wiederholt, bis der gewünschte Überhang erreicht ist. Abbildung 14 zeigt diese Ergebnisse.



Abbildung 14: Bewusstes Rekreieren dieses Phänomens [11]

Damit ist jedoch noch kein 90°-Überhang erreicht, da jede dieser Scheiben auf einem anderen Layer ist. Für einen wirklich waagerechten Überhang hat McCulloch den

Druck so angepasst, dass nach einer fertig gedruckten Scheibe die Z-Position gehalten wird und bei der nächsten Scheibe wird der Bereich ausgelassen, in dem sich die Scheiben vorher überschneiden haben. Und auch hier zeigt Abbildung 15 überraschend gute Ergebnisse:

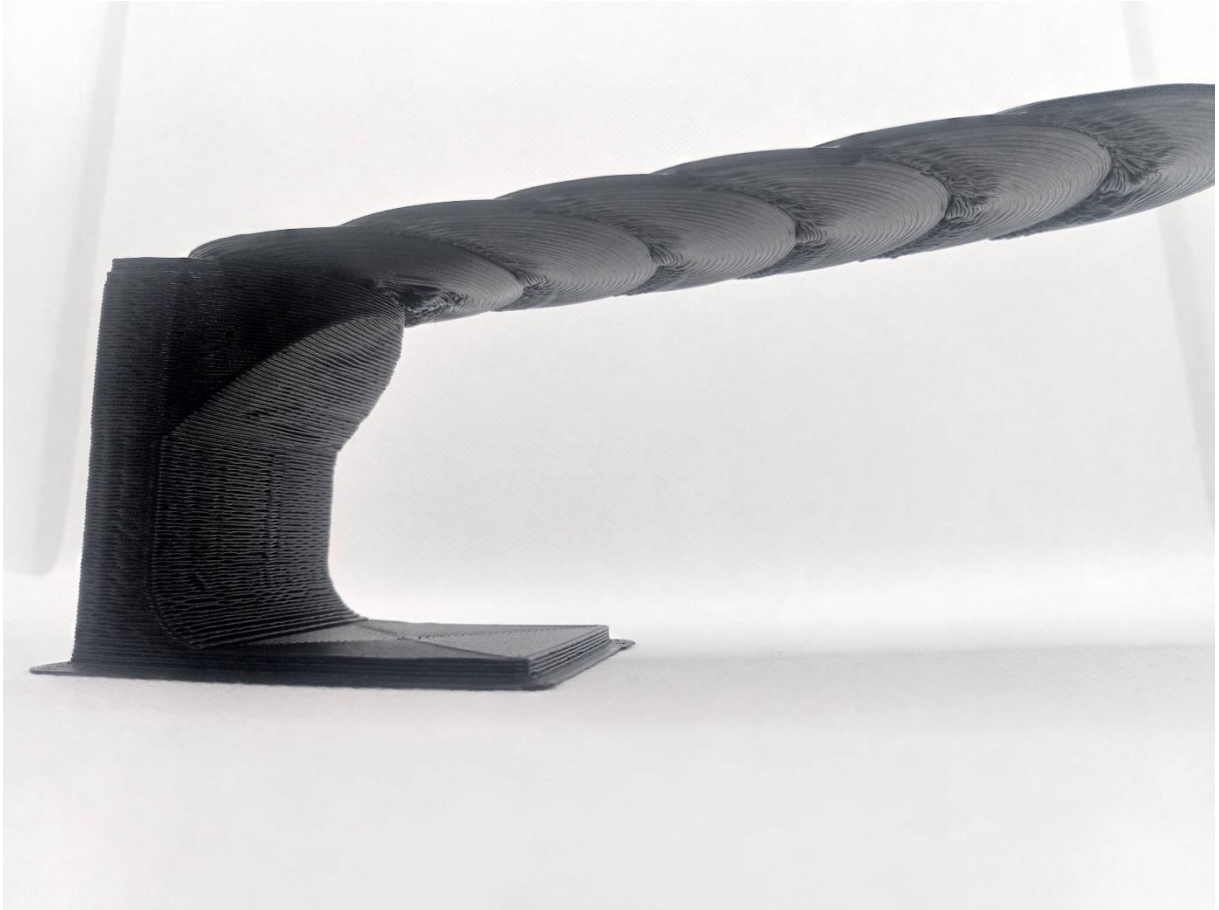


Abbildung 15: Drucken eines waagerechten Überhangs mit Arc Overhangs [11]

Das war der Beweis der Umsetzbarkeit der Idee. Der nächste Schritt war ein Python Programm, das ein zufälliges Polygon erstellt und dann mit größer werdenden Kreisbögen füllt, bis diese eine Kante des Polygons erreichen. Dann wird erneut mit einem neuen Mittelpunkt am Ende des letzten Arcs angefangen und so baut sich eine Struktur von vielen Bögen rekursiv auf, bis die komplette Fläche des Polygons ausgefüllt ist. Abbildung 16 zeigt genau dieses Programm mit einer farblichen Kennzeichnung der chronologischen Druckreihenfolge. Es startet mit der weißen Fläche und arbeitet sich von innen nach außen über die komplette Fläche.

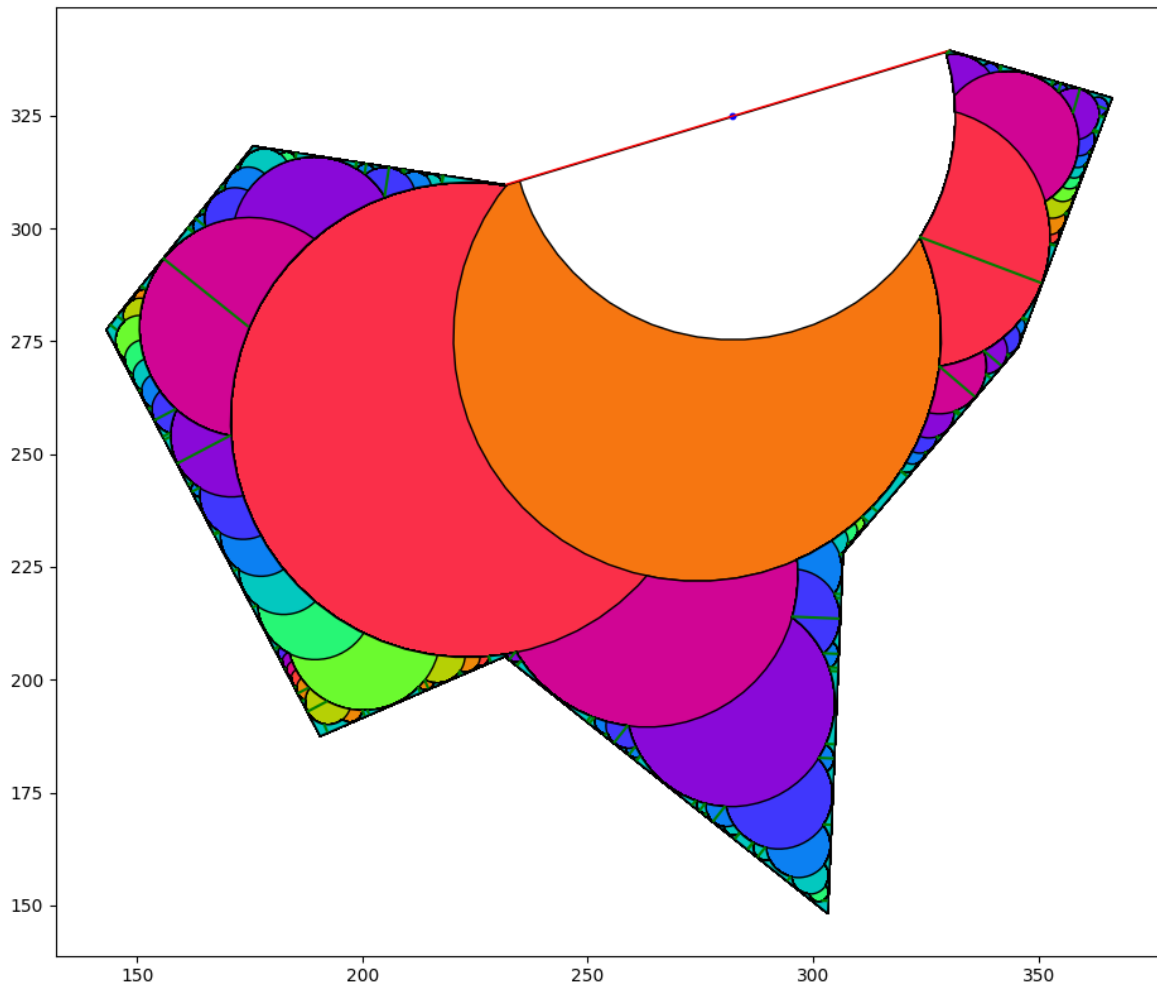


Abbildung 16: Python Programm, das eine beliebige Fläche mit Arc Overhangs füllen kann [11]

Dieser Algorithmus ermöglichte es, die Geometrien später für die Bahnplanung des 3D-Druckers zu nutzen. Das Python Script kann ebenfalls den G-Code für einen Testdruck generieren, also im Wesentlichen die Koordinaten aus der Simulation in G-Code Befehle umschreiben. Mit einigen Tests und einer ersten Parameterstudie formulierte McCulloch drei Druckeinstellungen, an denen man sich orientieren kann.

Zuletzt gibt er an, dass dieses Konzept noch Verbesserungspotential bietet und seine Arbeit fortgesetzt werden muss, um eine nutzerfreundliche Möglichkeit bereitzustellen, diese Technik im 3D-Druck zu verwenden. Als Beispiel nannte er, dass die Arcs sich nicht mehr so weit vergrößern, bis eine Kante der Geometrie erreicht wird, sondern die Grenze bei einem festgelegten Radius sein sollte.

1.9.2 Implementierung in SuperPleccer

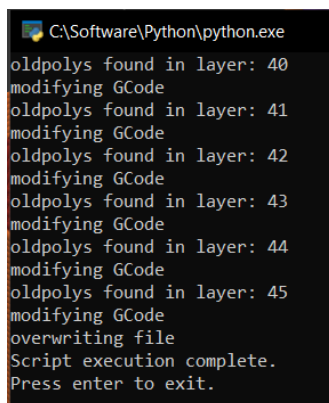
Schon seit 2018 wird an dem Slicing Programm SuperPleccer gearbeitet. Dieser Slicer basiert auf der Software SuperSlicer. Diese basiert wiederum auf PrusaSlicer, einem der bekanntesten Slicing-Programme weltweit von dem Unternehmen Prusa Research. Auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich PrusaSlicer als Slicer genutzt. Dieses Programm basiert auf der Software Slic3r. Das Slic3r Projekt

startete 2011 und sollte als open-source Software eine Möglichkeit darstellen, dass viele Entwickler das Programm immer weiter verbessern und neue Funktionen einbauen können. SuperPleccer ist somit einer der über 1000 Entwicklungszweige von Slic3r und der Niederländer Roberto van Maanen implementierte den Algorithmus von McCulloch für das Generieren von Arc Overhangs anstelle von normalen Überhängen. Das ist eine der vielen Fähigkeiten, die das Programm mit sich bringt. Da kein Fokus auf den Arc Overhangs liegt, sind die einzigen anpassbaren Einstellungen die Druckparameter, die jeder Slicer beinhaltet.

1.9.3 Implementierung als Post Processing Script

Im Februar 2023 beschäftigte sich Nicolai Wachenschwan aus Deutschland ebenfalls mit der Idee von McCulloch und realisierte das Drucken von Arc Overhangs mithilfe eines Post Processing Scripts (abgekürzt PPS). Dies ist ein Python Skript, welches den exportierten G-Code eines Slicers einliest, die normalen Überhänge mit Arc Overhangs ersetzt und den veränderten G-Code wieder ausgibt.

Das funktioniert nicht mit beliebigen Slicern, sondern nur mit PrusaSlicer. Dieser hat die besondere Eigenschaft, dass Überhänge beim Exportieren markiert werden mit dem Label „bridge infill“. Das erleichtert die Suche nach zu ersetzenden Überhängen erheblich. Für die Nutzung des Skriptes sind noch einige Schritte erforderlich, vom Download von Python über die Installation der Bibliotheken und das Einsetzen vom Dateipfad des Skripts in die PrusaSlicer Einstellungen. Wenn dann vom Slicer das 3D-Modell zu G-Code umgeschrieben wird, sind in der Vorschau vom Slicer noch keine Arc Overhangs zu sehen. Erst beim Exportieren wird das Python Skript aufgerufen und bearbeitet die Überhänge des G-Codes, was in Abbildung 17 zu sehen ist.



```
C:\Software\Python\python.exe
oldpolys found in layer: 40
modifying GCode
oldpolys found in layer: 41
modifying GCode
oldpolys found in layer: 42
modifying GCode
oldpolys found in layer: 43
modifying GCode
oldpolys found in layer: 44
modifying GCode
oldpolys found in layer: 45
modifying GCode
overwriting file
Script execution complete.
Press enter to exit.
```

Abbildung 17: Aufruf des PPS beim Export des G-Codes

Der große Vorteil an dieser Implementierung ist die Anpassungsfähigkeit, da nicht nur die Slicer-Einstellungen variabel sind, sondern auch viele Parameter im Python Skript verändert werden können. Das bietet umfangreichere Gestaltungsmöglichkeiten für die Optimierung der Druckqualität. Zu den Parametern, die im Algorithmus angepasst werden können, zählt auch der maximale Radius der Arcs. Damit ist genau der Verbesserungsvorschlag von McCulloch realisiert worden, nämlich dass die Kreisbögen bis zu einem festgelegten Wert wachsen können und nicht mehr so lange größer werden, bis eine Kontur der Fläche erreicht ist.

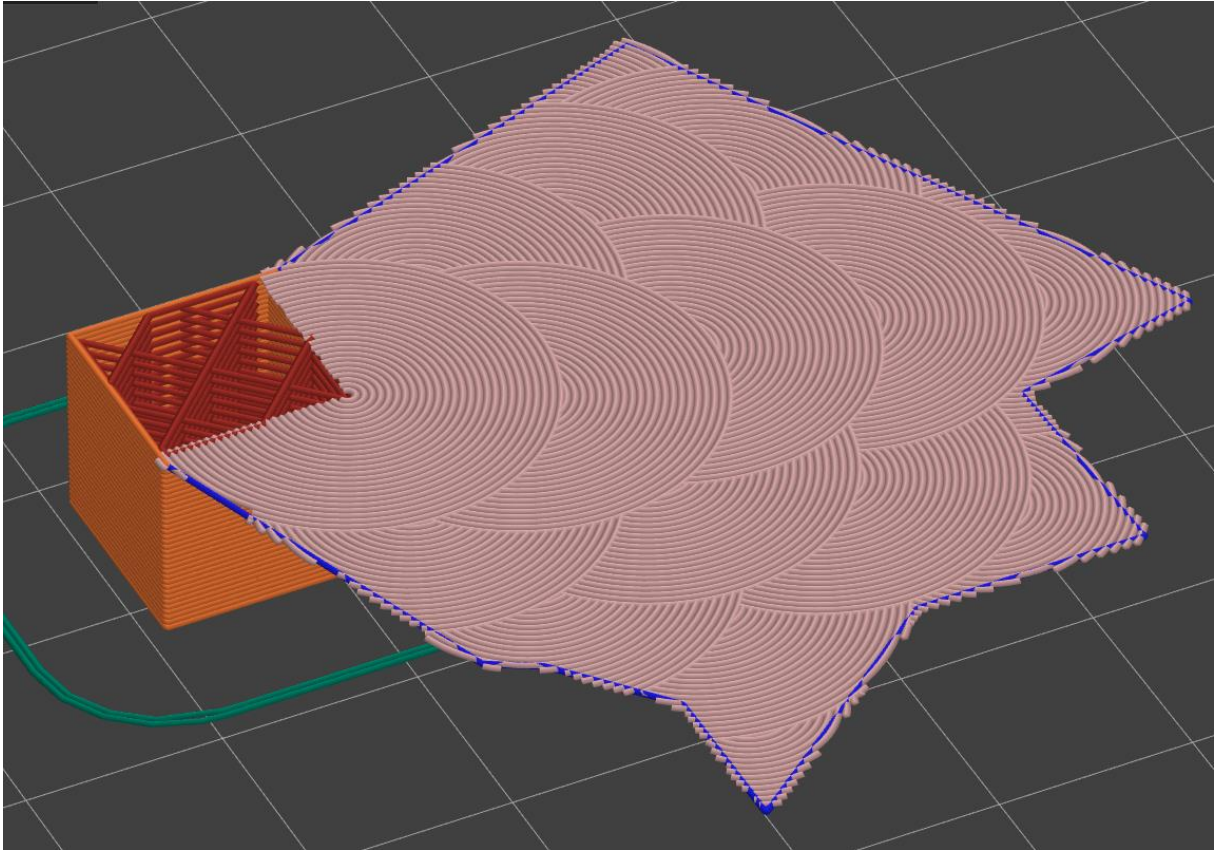


Abbildung 18: Vergleich verschiedener Werte für maximalen Arc-Radius - hier 10 mm

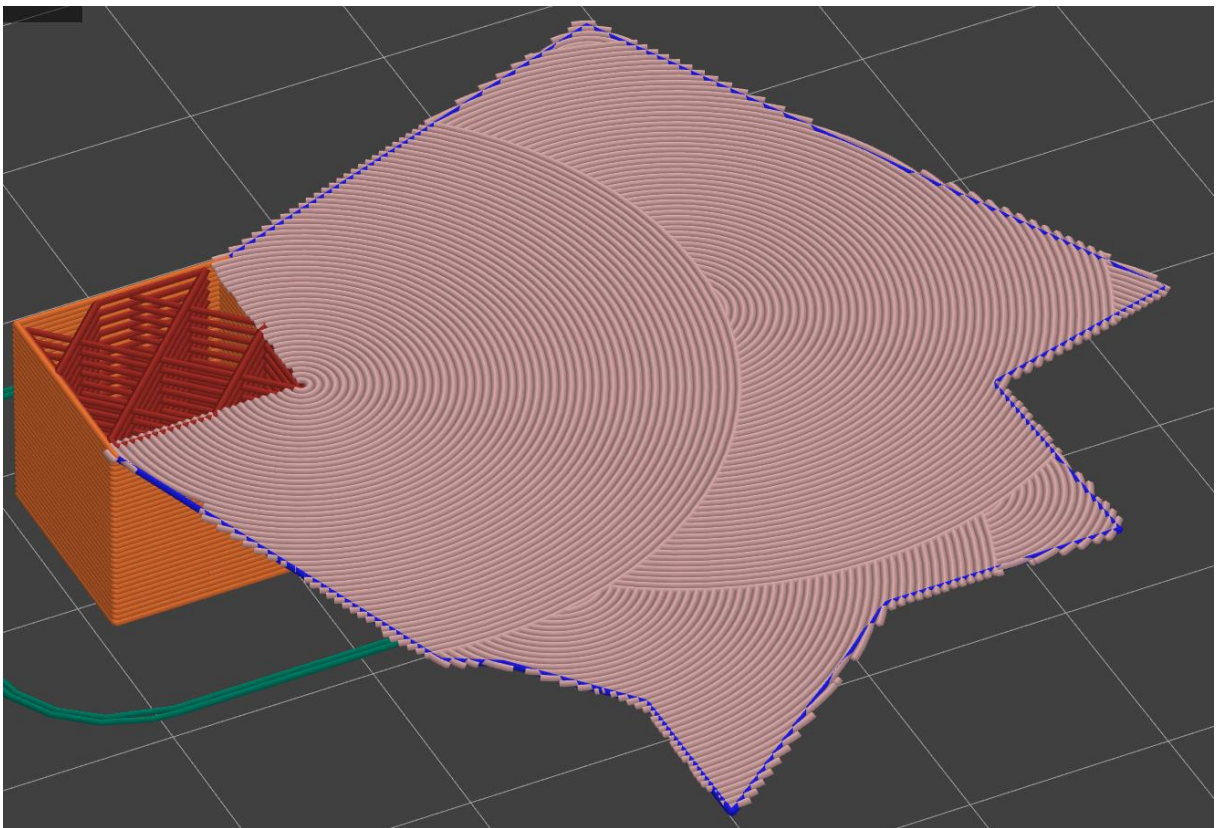


Abbildung 19: Vergleich verschiedener Werte für maximalen Arc-Radius - hier 20 mm

Abbildungen 18 und 19 zeigen die Nutzung dieser Funktion mit unterschiedlichen Werten im direkten Vergleich. Es wurde eine Geometrie mit Arc Overhangs gefüllt und in Abbildung 18 wurde der maximale Radius der Arcs auf 10 Millimeter gesetzt, wobei dieser Wert in Abbildung 19 doppelt so hoch gesetzt wurde.

Wachenschwan schreibt außerdem auf seiner Github-Seite, dass große und lange Kreisbögen (in seinem Beispiel Halbkreise) zu einer Wölbung nach unten tendieren, was in den folgenden Abbildungen 20 und 21 zu sehen ist. Das liegt an der Geometrie und daran, dass sich lange Arcs beim Abkühlen zusammenziehen und damit Druck auf die bereits gedruckten Bögen ausüben. Es bleibt keine andere Möglichkeit als Stauchung des Materials nach unten.

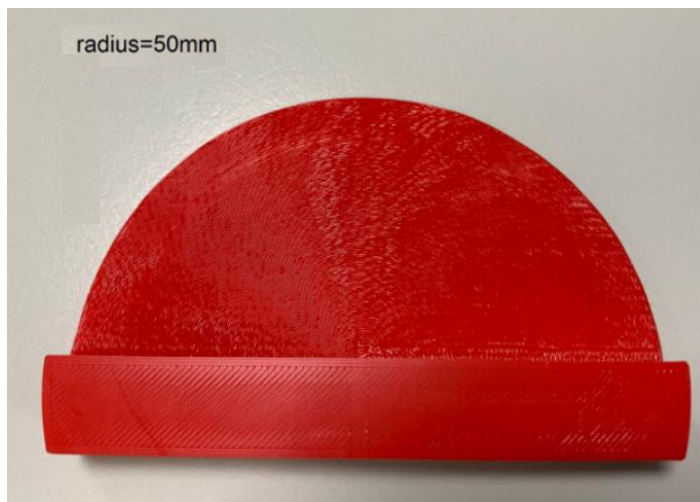


Abbildung 20: Demonstration von Wölbung bei langen Arcs (in Anlehnung an [41])

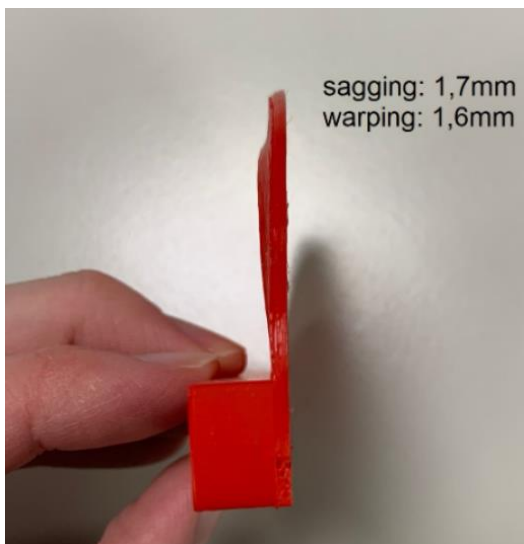


Abbildung 21: Wölbung des Teils von der Seite [41]

Das nächste Problem, das durch zu große Radien der Arcs entsteht ist das Erreichen von verwinkelten Ecken. Besonders bei komplexeren Bauteilen und verzweigten Flächen ist ein großer Radius hinderlich und kann in manchen Fällen unmöglich zu drucken sein. Mit einem kleineren Wert für den maximalen Radius können solche Ecken besser erreicht werden.

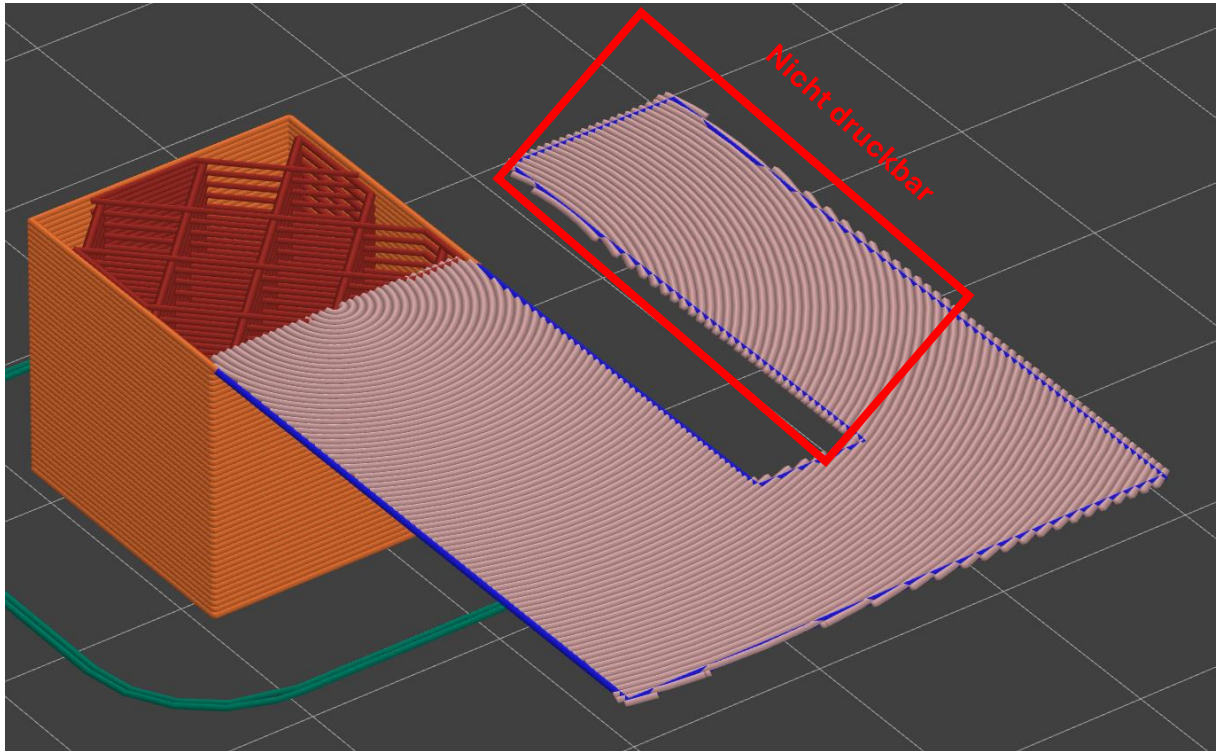


Abbildung 22: Verschachteltes Druckobjekt mit unlimitedem Arc Radius

Abbildung 22 zeigt ein Beispiel, bei dem ein Bereich des Bauteils mit großen Arc-Bögen nicht gedruckt werden können. Der rote Bereich ist nicht druckbar, da die Arcs mit ansteigendem Radius (von innen nach außen) gedruckt werden

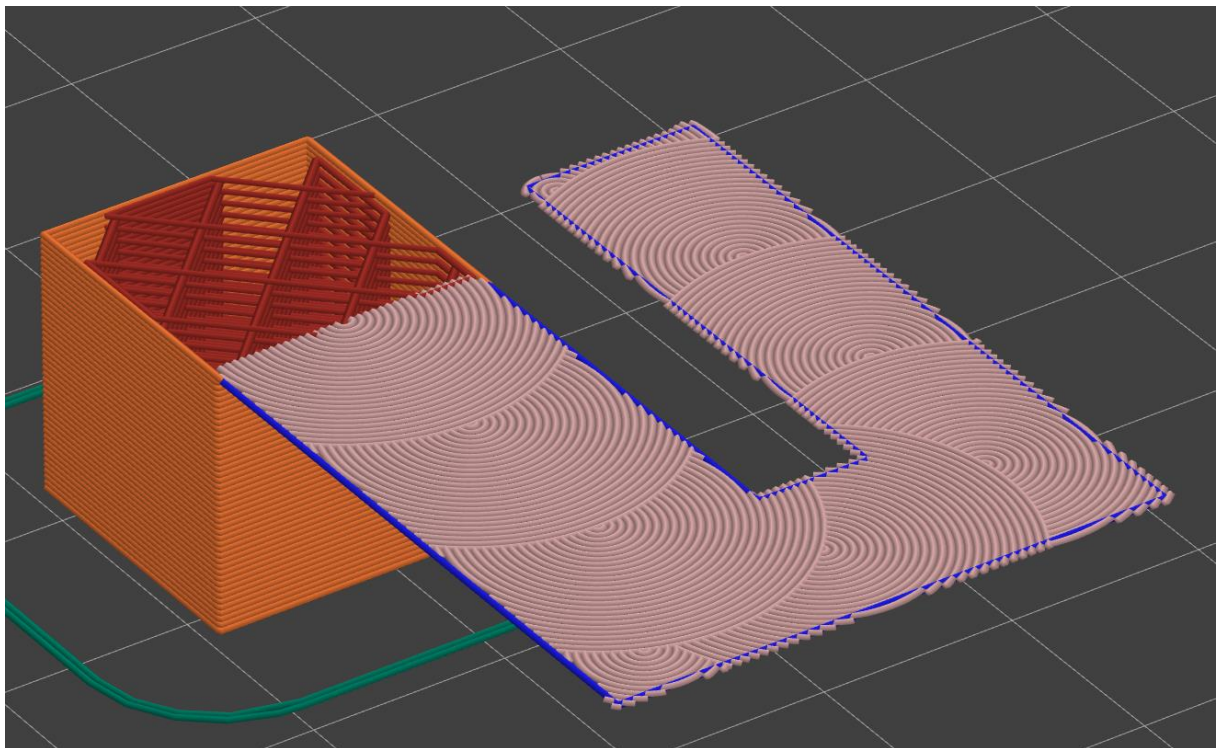


Abbildung 23: Gleiches Druckobjekt mit gedrosseltem Arc Radius = 10 mm

Abbildung 23 zeigt eine druckbare Version mit reduziertem maximalem Radius.

Eine weitere Einstellung bestimmt den Offset, mit dem die konzentrischen Kreisbögen gedruckt werden sollen. Das hat den Hintergrund, dass besonders die kleinen Arcs so kurz sind, dass sie zum einen keinen richtigen Halt finden und zum anderen nicht schnell genug abkühlen für den nächsten Bogen. Das resultiert häufig im Heruntersacken des Materials, da es im flüssigen Zustand von der Schwerkraft nach unten gezogen wird. Mit dem Verschieben (Offset) des Mittelpunktes auf die schon gedruckte Fläche sind die ersten Bögen schon lang genug, damit diese Probleme nicht auftreten. Abbildung 24 zeigt ein Modell ohne Offset des Mittelpunktes, bei dem die kleinen Arc-Bögen für eine schlechtere Oberflächenqualität sorgen.

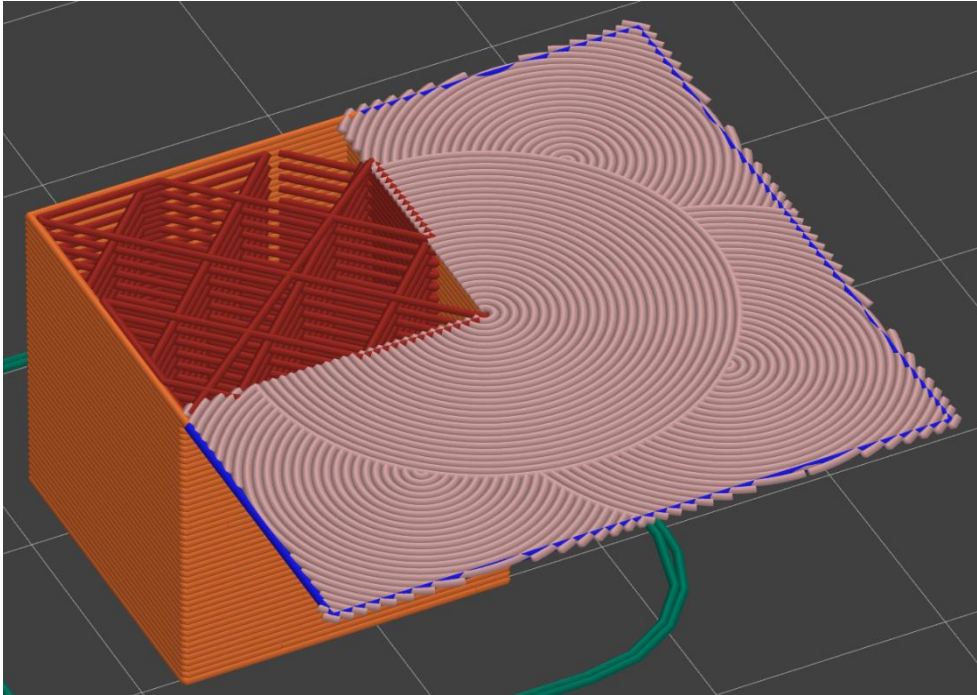


Abbildung 24: Druckobjekt ohne Offset der Arc-Mittelpunkte

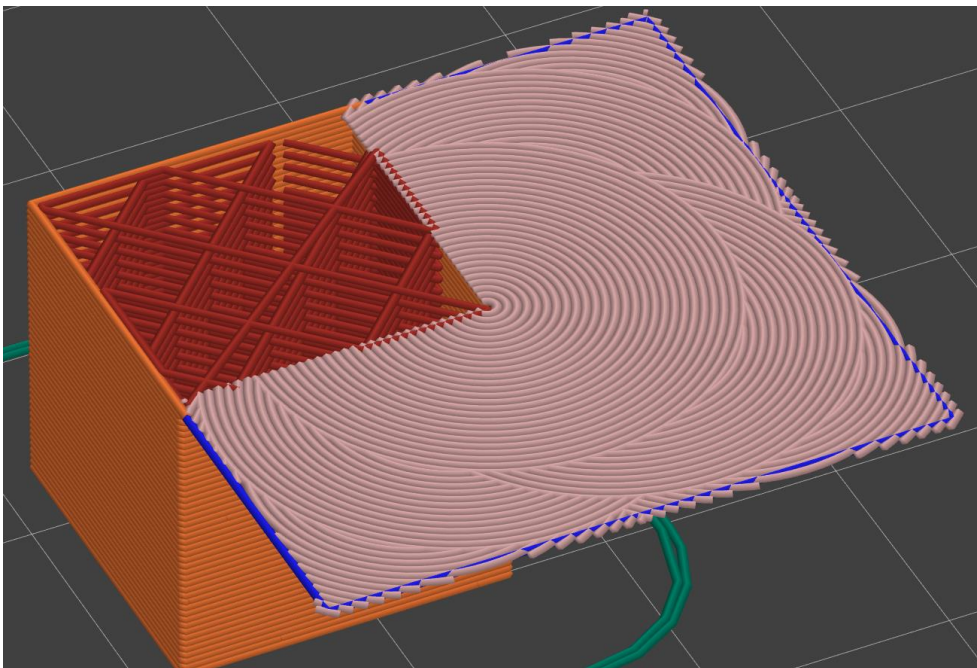


Abbildung 25: Gleiches Druckobjekt mit Verschiebung der Mittelpunkte in die bereits gedruckte Fläche

Außerdem sind allerlei Geschwindigkeiten im PPS anpassbar, im Wesentlichen hier die Druckgeschwindigkeit der Arc Overhangs. Da in der Luft gedruckt wird mit dem Ziel, dass das Filament seitlich hält, braucht das Material einerseits Zeit, um seitlich genug Kontaktfläche aufzubauen und andererseits ausreichend Zeit, um vollständig abzukühlen, bevor der nächste Arc gedruckt wird. Somit ist eine sehr geringe Druckgeschwindigkeit von 1-5 mm/Sekunde nicht unüblich. Darüber hinaus ist die Druckgeschwindigkeit des Infills oberhalb der Arc Overhangs und die der Konturen (auf Englisch: perimeter) anpassbar sowie die Lüftergeschwindigkeit während und oberhalb des Überhangs.

Neben der Generierung von Arc Overhangs ersetzt das Skript ebenfalls den Infill vom Layer direkt darüber mit der Hilbert Kurve. Das hat den Hintergrund der geringeren thermischen Spannungen beim Abkühlen, wie im Kapitel „1.6 Hilbert Kurve als Infill-Muster“ beschrieben. Zusätzlich zur variablen Infilldichte gibt es im PPS von Wachenschwan noch die Funktion, dass alle n Sekunden der Bereich geändert wird, in dem der Infill gedruckt wird. Das Ziel dabei ist, eine zu große Hitzeakkumulation zu vermeiden, die den Arc-Layer unter der Hilbert Kurve weich machen würde. In der Schicht gibt es als einzige Möglichkeit zur Wärmeableitung nur den Überhangs-layer. Weil dieser filigran und dünn ist, wird der schon bei geringer Erhitzung unter der Schwerkraft nachgeben und nach unten sacken.

1.9.4 Grundlage der Bachelorarbeit

Im Kontext dieser Arbeit konzentriere ich mich auf die Implementierung von Nicolai Wachenschwan in Form des Post Processing Scripts mit der Begründung, dass eine höhere Anpassungsfähigkeit und die Möglichkeit für komplexere Veränderungen des Druckes gegeben sind.

2 Praktischer Teil

Im praktischen Teil dieser Arbeit geht es darum, mit eigenständigen und selbst durchgeführten Experimenten die Forschung und Parameterstudie an Arc Overhangs zu betreiben. Dies soll ein besseres Verständnis für die Designorientierung und die Wahl der Druckeinstellungen bringen. Weiterhin soll untersucht werden, ob und welche weiteren Anpassungen erbracht werden müssen, um die Funktionen von üblichen Werkzeugen, wie Slicern zu übertreffen.

2.1 Bestimmung von Prüfkörpern

In der Versuchsreihe wird für den ersten Schritt, wie im Kapitel „1.7 Der Prozess vom Modell zum Druckobjekt“ beschrieben, ein 3D-Modell von einem Bauteil benötigt, welches einen Überhang beinhaltet. Das Modell hat dabei schon Auswirkungen auf den endgültigen Druck und dessen Qualität, daher sind einige Anforderungen nötig. Es soll möglichst aussagekräftig Qualitätsmerkmale widerspiegeln können. Dabei müssen die Qualitätskriterien optisch ohne zusätzliche Hilfsmittel ablesbar sein. Das Druckobjekt soll beispielhaft eine typische Herausforderung der additiven Fertigung darstellen, in diesem Fall ein Bauteil mit waagrechtem Überhang, was ohne die Verwendung von Arc Overhangs oder Supportmaterial nicht druckbar ist. Der Druck muss reproduzierbar sein, so dass ein bestimmter Parametersatz, bzw. ein G-Code auch bei wiederholten Versuchen immer das gleiche Ergebnis erbringt. Des Weiteren sollte bei einer größeren Testreihe nicht nur der Materialverbrauch effizient sein, sondern auch die Druckzeit sollte geringgehalten werden. Mit dem Testobjekt soll ein Beispiel repräsentiert werden, das auch skaliert in unterschiedlichen Maßstäben immer noch Aussagekraft behält.

Arc Overhangs sollen im 3D-Druck möglichst häufig Anwendung finden, selbst in komplexen und verwinkelten Bauteilen, sowie auch in Sonderfällen. Diese sind zum Beispiel sehr dünne und filigrane Bauobjekte, Hohlkörper oder spiralförmige Überhangsflächen ohne Querverbindungen. Obwohl diese Ziele in Zukunft erreicht werden sollen, sind dies keine Anforderungen für den ersten Prüfkörper. Die Zielsetzung besteht in erster Linie darin, mit optimalen Druckparametern die beste Qualität zu erreichen. Erst wenn das geschafft ist, kann fortlaufend die Machbarkeit in verschiedenen Sonderfällen geprüft werden.

2.1.1 Das gewählte Prüfobjekt

Der Prüfkörper, mit dem die Parameterstudie durchgeführt werden soll, ähnelt einem Sprungbrett. Es setzt sich zusammen aus zwei übereinanderliegenden Quadern unterschiedlicher Maße. Der untere Quader stellt den Fuß des Objektes dar. Die Grundfläche beträgt 20 x 10 mm und hat Kontakt mit dem Druckbett. Die Höhe beträgt 10 mm. Der obere Quader hat die Maße 20 x 40 mm mit einer Höhe von 5 mm. Das zusammengesetzte Teil hat somit eine waagerechte Überhangsfläche von 20 x 30 mm. Diese Fläche soll ausreichen, um jeweils auch kleinere und größere Überhänge grob zu simulieren. In der folgenden Abbildung 26 sieht man den beschriebenen Körper:

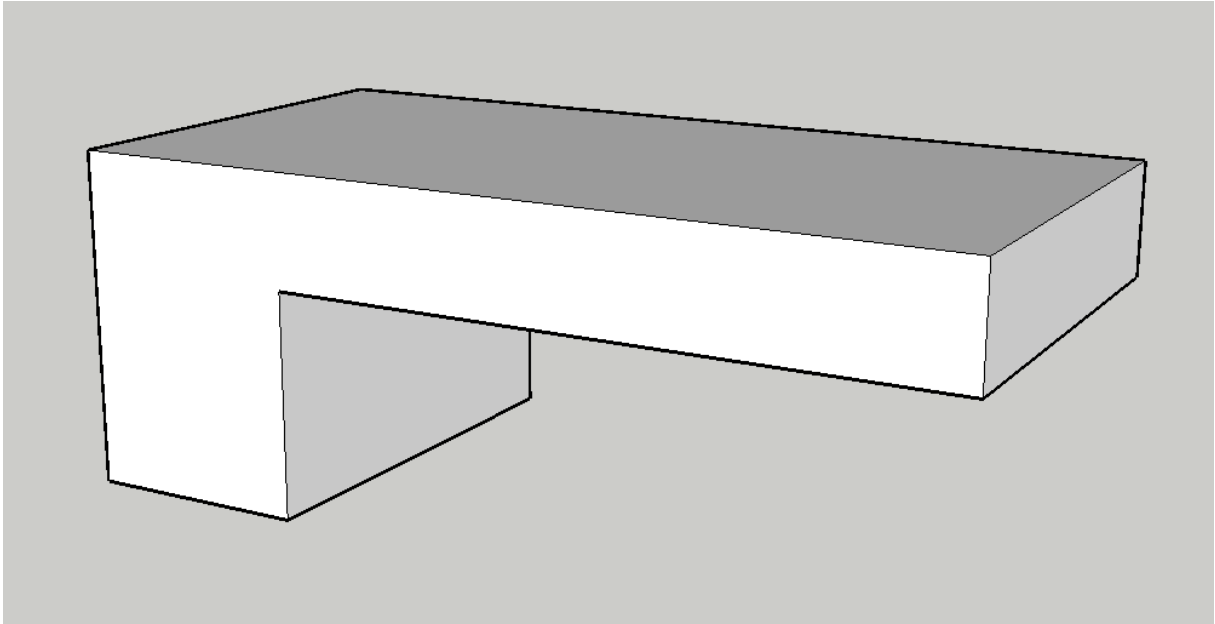


Abbildung 26: Gewählter Prüfkörper für die Versuchsreihe

2.2 3D-Drucker und Equipment

Der genutzte 3D-Drucker ist das Modell X MAX von der Marke QIDI Tech. Er bietet einen schließbaren Druckraum von 300 x 250 x 300 mm. Die Materialextrusion erfolgt über einen Direct Drive Extruder mit einem Düsendurchmesser von 0,4 mm, was ein häufig gesehener Standard im FDM-Druck ist. Der Druckkopf kann sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 150 mm/s bewegen und druckt mit einer Genauigkeit von 0,05 – 0,2 mm. Das Filament, das durch die ganze Arbeit hinweg benutzt wird, ist PLA mit dem Durchmesser 1,75 mm. Dieser Drucker eignet sich gut für die folgende Testreihe, da dessen Eigenschaften und Funktionen üblich im 3D-Druck sind. Mit einem Drucker, der deutlich besser oder schlechter wäre als der Durchschnitt, können keine Ergebnisse und Schlussfolgerungen gezogen werden, die als Richtlinien für beliebige andere Drucker gesehen werden können.

2.3 Parameterstudie

Die Parameterstudie hat das Ziel, die optimalen Parametersätze für verschiedene Anwendungen zu ermitteln. Hierzu werden vor der Versuchsreihe Qualitätskriterien definiert, anhand derer die fertigen Drucke bewertet werden können. Mit der überlegten Veränderung von nur einem oder wenigen Parametern können die erkennbaren Unterschiede der gedruckten Teile qualitativ eingeordnet und verglichen werden. Mit dieser Analyse kann dann die nächste kleine Veränderung vorgenommen werden. So wird der Parametersatz immer genauer, bis ein Punkt nahe dem Optimum erreicht wird. Ein „optimaler“ Parametersatz ist schwer zu erreichen, da durch äußere Umstände geringe Fluktuationen in der Qualität des Endergebnisses vorkommen können, die nicht direkt auf einzelne Parameter zurückzuführen sind. Solche Umgebungseinflüsse sind beispielsweise die Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit,

Druckraumtemperatur, Feuchtigkeit des Filaments, Vibrationen und Erschütterungen, Düsenverschmutzung und weitere. Dies sind alle Faktoren, die Unterschiede im Druck verursachen können, selbst wenn der gleiche G-Code mit dem gleichen Drucker und Filament ausgeführt wird.

Die Schlussfolgerung, wann welche Veränderung der Parameter vorgenommen werden muss, erfordert ein umfassendes Hintergrundwissen im Bereich 3D-Druck. Mit dem Wissen, welchen Einfluss die einzelnen Parameter grundsätzlich auf einen Druck haben, können die negativ ausfallenden Qualitätskriterien mit einer Anpassung reduziert werden.

2.4 Qualitätskriterien

Anhand der Qualitätskriterien kann die Qualität eines gedruckten Objektes rational bewertet werden. Diese Kriterien sollten so gut wie möglich alle Druckfehler und Artefakte widerspiegeln. Diese Analyse dient einem Vergleich zu einem normalen Druck ohne Arc Overhangs, um die Qualität dieser neuen Methode zu bewerten und nicht die Qualität des Druckers. Folgende Qualitätskriterien werden aufgezeichnet:

2.4.1 Oberflächenqualität

Die Oberflächenqualität ist auch bei normalen Drucken eine der auffallendsten Eigenschaften. Bei waagerechten Flächen besteht die Oberfläche aus solidem Infill und bei Seitenflächen aus der Kontur der Schicht. Es wird darauf geachtet, wie glatt und homogen die Flächen sind. Es ist mitzubenennen, wie stark die Schichtlinien zu sehen sind, also die einzelnen Schichten übereinander. Mit Mikroskopen oder Oberflächenrauheitsmessgeräten, wie einem Profilometer, kann dieses Kriterium auch konkret bestimmt werden. In dieser Anwendung reicht jedoch die visuelle Inspektion.

2.4.2 Maßgenauigkeit

Ebenfalls eine der wichtigsten Eigenschaften eines Drucks ist die geometrische Formtreue. Die beschreibt die Übereinstimmung der tatsächlichen Maße im 3D-Modell mit denen vom gedruckten Objekt. Meist ist hier die Genauigkeitstoleranz vom Drucker nicht so ausschlaggebend im Vergleich zu anderen Faktoren, wie zum Beispiel der Kontraktion beim Abkühlen. Eine Abweichung der Toleranzen einer Geometrie kann im zu großen Rahmen die Funktionalität von Bauteilen einschränken oder verhindern. Die Maßgenauigkeit kann grob mit bloßem Auge erkannt werden, ist aber auch mit Messgeräten wie Schublehren, Linealen, Winkelmessern oder 3D-Laser-Scannern messbar.

2.4.3 Verformungen und Warping

Im Bereich der Maßgenauigkeit gibt es noch Abweichungen, die durch bestimmte Phänomene zustande kommen. Eines dieser Phänomene ist Warping, was schon im Theorieteil dieser Arbeit beschrieben wurde (siehe Kapitel „1.5 Warping“). Es ist ein gesondertes Qualitätskriterium, da andere Anpassungen notwendig sind, um eine

Wölbung zu vermeiden. Unter Verformungen sind ebenfalls besondere Geometrieabweichungen gemeint, wie zum Beispiel das Heruntersacken von einem flachen Überhang, wenn das Material zu warm wird. Dieses Phänomen ist meist visuell von außen erkennbar auch, wenn die Ursache dafür häufig intern im Bauteil liegt.

2.4.4 Schichthaftung

Die Stabilität eines Bauteils in Z-Richtung basiert auf der Schichthaftung während und nach dem Druck. Diese ist gegeben dadurch, dass das flüssige und heiße Filament auf die darunterliegende Schicht gepresst wird und beim Abkühlen eine feste Verbindung schafft. Eine Schicht, die per Arc Overhangs in der Luft gedruckt wurde, ist sehr fragil und kann nur sehr wenig Widerstand gegen Druck von oben leisten. So ist die Fähigkeit, das Filament gegen die Überhangsschicht zu drücken eingeschränkt. Die Schichthaftung ist im großen Ausmaß auch optisch zu erkennen, wenn zwischen den Schichten etwas Luft ist. Dadurch ist auch bei der zerstörungsfreien Prüfung eine leichte Elastizität in Z-Richtung zu erkennen, wenn man die Layer zusammendrückt. Im kleineren Maßstab ist dieses Kriterium schwerer zu analysieren, da zum Beispiel mit einem Zugtest die Kraft bestimmt wird, die notwendig ist, um zwei Schichten voneinander zu trennen. Dafür sind nicht nur professionelle Messwerkzeuge nötig, sondern auch die Zerstörung des Bauteils. Gleichmaßen ist die Strukturstabilität messbar. Dabei geht es um die Belastbarkeit in alle Richtungen, nicht nur in Z-Richtung.

2.4.5 Artefakte

Im Druck können aus unterschiedlichen Gründen verschiedene Arten von Anomalien auftauchen, die negativ in der Druckqualität auffallen. Zu diesen gehören unter anderem auch das Vorkommen von Stringing. Das passiert, wenn der Extruder eigentlich nicht drucken soll, jedoch die Düse so heiß ist, dass das Filament geschmolzen wird und ohne aktive Extrusion aus der Düse herausläuft. Dabei entstehen dünne Fäden, die sehr schnell abkühlen und entweder im fertigen Druck sichtbar sein können oder im schlimmeren Fall beim Druck ein Hindernis darstellen, was das Bauteil beim Druck von der Grundplatte trennt. Ebenfalls gehören Über- und Unterextrusionen in diese Kategorie. Überextrusionen sind häufig durch größere „Klumpen“ oder Tropfen an Material zu erkennen. Wenn diese intern im Infill vorkommen, sind sie nicht sehr ausschlaggebend, sind sie jedoch an einer Außenfläche, so fallen sie ästhetisch störend auf. Teilweise beeinflussen sie auch die Geometrie der Außenwand. Bei Unterextrusionen sollte eigentlich Filament gedruckt werden, wird aber durch einen fehlerhaften Filamentfluss verhindert. Das resultiert in Lücken in der Schicht und kann die Schichten darüber ebenfalls beeinflussen, da in dem relevanten Bereich dann kein Material ist, auf das die nächste Schicht gedruckt werden kann.

2.4.6 Wiederherstellung der Ebenheit nach Arc Overhangs

Speziell für die vorliegende Arbeit wird noch ein weiteres aussagekräftiges Kriterium beigefügt: Die Messung, ab welcher Schicht nach den Arc Overhangs die Ebenheit und Qualität von Schichten eines normalen Drucks wiederhergestellt werden. So kommt es beim Drucken von Arc Overhangs vor, dass durch Warping, Sagging (auf Deutsch: Durchsacken) oder Schichtablösungen die Layer darüber auch noch beeinträchtigt

werden. Je nach Ausmaß des Fehlers braucht der Druck einige Schichten, um den Fehler auszugleichen. Ab einem bestimmten Layer normalisiert sich der Druck wieder. Ebenfalls zu betrachten sind Bauteile, bei denen die Qualität der Überhangsschichten eine geringere Relevanz hat. Ein Beispiel dafür wäre ein hohler Würfel, bei dem Arc Overhangs für die obere Fläche genutzt werden und Fehler im Überhang nur intern bleiben.

2.4.7 Druckzeit und Materialverbrauch

Ein Kriterium, das besonders bei hohen Stückzahlen und einer industriellen Produktion relevant wird, ist die Verwendung von Ressourcen. Für Unternehmen wird diese Form des Druckens erst in Betrachtung gezogen, wenn es wirtschaftlich rentabel ist. Dieses Thema wird am Ende dieser Arbeit noch ausführlich behandelt. Zur Analyse ist dabei der Materialverbrauch zu betrachten, nicht nur finanziell, sondern auch ökologisch. Die Druckzeit ist nicht nur entscheidend für die Herstelldauer und die zeitliche Strukturierung in der Produktion, sondern bringt auch finanziell betrachtet Stromkosten mit sich.

2.5 Einbindung von Methoden

Im Laufe dieser Arbeit sind Methoden zu verstehen als Werkzeuge zur Anpassung des G-Codes, die das genutzte Slicing-Programm und die meisten anderen nicht beinhalten. Das umfasst jegliche Veränderung des vom Slicer exportierten G-Codes. Diese Methoden sind notwendig für die Anpassung und Verbesserung von Arc Overhangs.

2.6 Methoden aus dem Post Processing Script

Mehrere Funktionen sind im Post Processing Script von Wachenschwan schon enthalten, da einige davon essenziell für die Generierung von Arc Overhangs sind. Andere bieten eine Möglichkeit, mit Parametern den Druck und die Bahnplanung in der Überhangsschicht und den Schichten darüber anzupassen. Dazu gehören die Aufteilung der Hilbert Kurve als Infill gegen Wärmeakkumulation oder die Reduktion des maximalen Radius der Arcs, um das Warping oder Heruntersacken von Arcs zu vermeiden. Diese und noch einige andere wurden schon im Kapitel „1.9.3 Implementierung als Post Processing Script“ ausführlicher beschrieben.

2.7 Eigene Methoden

Nach Aussage von Wachenschwan, sei das von ihm geschriebene Skript noch verbesserungsfähig. Es habe Einschränkungen und er ruft aktiv dazu auf, dass von anderen interessierten Hobbydruckern Verbesserungen und Erweiterungen beigetragen werden sollen. So wurde in der experimentellen Phase dieser Arbeit einige Ideen von neuen Methoden entwickelt, ausgetestet und verbessert.

2.7.1 Druckpause zum Abkühlen

Ein zu Beginn auftauchendes und lange anhaltendes Problem stellte das Absacken des Überhangs dar. Beim Drucken der Arc-Bögen selbst besteht noch kein Problem, es tritt erst auf, wenn die darüberliegenden Schichten gedruckt werden. Im PPS gibt es zwar schon die Funktion, dass die Hilbert Kurve chronologisch aufgeteilt wird für eine bessere Hitzeverteilung. Dennoch kann es je nach Infill-Dichte und Druckgeschwindigkeit vorkommen, dass die Schicht der Arcs zu sehr erwärmt wird und sich nach unten verformt. Eine weitere Ursache des Problems ist die zweite Schicht über der Überhangsebene. Wenn diese nämlich direkt im Anschluss auf die erste Infill-Schicht gedruckt wird, hatte diese noch keine Zeit, um abzukühlen und sich zu verfestigen. Mit der eingeschränkten Wärmeableitung erhitzt sich damit der Überhang und wird durch die Schwerkraft nach unten gezogen. Beim ersten Infill-Layer passiert das noch nicht, da die Arcs so langsam gedruckt werden, dass die ganze Fläche genug Zeit hat, um vollständig abzukühlen. Aus dieser Problemstellung folgte die Methode, eine Pause zwischen den Layern einzufügen, bevor der Druck in der nächsten Ebene fortgesetzt wird. Der Befehl M601 im G-Code pausiert den Druck so lange in einer Nullposition, bis er manuell am Drucker fortgesetzt wird. Um diesen manuellen Schritt zu umgehen, kann auch eine Pause mit dem Befehl G4 gefolgt von der Wartezeit in Millisekunden eingefügt werden. Mit dem Befehl G4 P120000 wird also eine Pause von zwei Minuten eingelegt, bevor der Druck fortgesetzt wird. Das Problem dabei ist, dass der Extruder während dieser Pause an seiner aktuellen Position verharrt, die meist direkt auf dem Druckobjekt liegt. In den zwei Minuten Wartezeit bleibt dann die Düse in Kontakt mit dem gedruckten Teil, wodurch das Filament an dieser Stelle schmilzt. Das verursacht nicht nur unschöne Artefakte, sondern kann auch den fortlaufenden Druck negativ beeinflussen. Der Druckkopf muss für die Pause also an eine andere Stelle fahren, die außerhalb des Bauteils liegt. Als Pausenpunkt wurde der Punkt X = 20 und Y = 200 ausgesucht, da dieser in der Ecke des Druckbetts und weit entfernt vom Bauteil liegt. Mit einer Wartezeit von zwei Minuten, hat das Bauteil ausreichend Zeit, um abzukühlen. Jedoch kann man feststellen, dass in der Zeit das Filament herausläuft, da die Druckdüse immer noch eine Temperatur von ca. 200 °C hat und das Filament im Extruder weiterhin erhitzt. Das Resultat davon ist Stringing, was ebenfalls Probleme für den weiteren Druck verursacht. Um dieses Problem zu verhindern, können drei Maßnahmen getroffen werden. Die übliche Lösung für das Vermeiden von Stringing ist eine Retraction. So wird auch in diese Pause-Sequenz der Einzug des Materials um 5 mm vor der Bewegung zur Pause-Position eingefügt. Die zweite Maßnahme ist das Senken der Temperatur. Der hier genutzte Kunststoff Polylactid Acid (PLA) schmilzt bei ca. 160 – 190 °C. Wenn der Extruder auf eine Temperatur abgekühlt wird, die darunter liegt, zum Beispiel 150 °C, dann kann das Filament sich nicht mehr verflüssigen und herauslaufen. Der G-Code-Befehl dafür ist M104 S150 und wird ganz am Anfang der Pause-Sequenz eingeführt, weil der Extruder einige Zeit braucht, um tatsächlich diese Temperatur zu erreichen. Eigene Experimente zeigten, dass etwa 30 Sekunden für das Abkühlen benötigt werden. Die letzte Maßnahme gegen Stringing ist das Absetzen des Druckkopfes auf dem Druckbett. Dadurch entsteht eine Art mechanischer Verschluss, der verhindert, dass Filament in der Wartezeit herausfließt. Der Druckkopf wird dabei zuerst auf die entsprechende XY-Position gefahren und danach erst auf der Grundplatte abgesetzt, da im Gegensatz zur planaren XY-Bewegung die räumliche XYZ-Bewegung das Bauteil schneiden könnte.

Nach der Pause wird die Druckertemperatur wieder auf 200 °C gesetzt und gewartet, bis die Temperatur auch erreicht ist mit dem Befehl M109 S200. Anschließend wird die Retraction rückgängig gemacht mit einem Priming, und das Filament wird wieder 5 mm vorgeschoben. Da nun mehr als zwei Minuten nicht mehr gedruckt wurde, kann mit einem Wiping ein ausreichender Materialfluss garantiert werden. Das Wiping (auf Deutsch: Abwischen) wird häufig vor einem Druck gemacht und besteht aus dem Drucken einer Linie unabhängig vom Bauteil, sodass sichergestellt ist, dass das Filament gleichmäßig fließt. Mit dem Befehl G1 X70 E1.5 F2400 wird 1,5 mm Filament mit einer Geschwindigkeit von 2400 mm/Minute extrudiert, während der Druckkopf sich 50 mm in X-Richtung bewegt. Wenn nun nach dem Wiping weitergedruckt wird, ist jedoch immer noch Stringing zu beobachten, also wird danach ebenfalls noch eine Retraction eingefügt. Der Extruder fährt dann 30 mm weiter in X-Richtung. Wenn dabei ein Faden entsteht, wird dieser in drei Sekunden zusätzlicher Wartezeit ausgehärtet, sodass er nicht mehr plastisch langgezogen werden kann. Mit dem Befehl G1 X180 F12000 wird dann der Druckkopf mit sehr hoher Geschwindigkeit weitere 80 mm weggezogen, sodass der ausgehärtete Faden abreißt. Damit ist mehrfach und redundant sichergestellt, dass kein Stringing den Druck beeinflusst. Als letztes wird der Druckkopf noch auf eine höhere Z-Position gebracht, damit der Extruder bei der Rückkehr zum Bauteil nicht mit diesem kollidiert. Dies ist durchaus nicht trivial, da erst mit einer anderen Funktion die Z-Höhe der jeweiligen Ebene gefunden werden muss. Diese Funktion durchsucht den G-Code des kompletten Layers und gibt den Z-Wert zurück, der in Bewegungsbefehlen genutzt wird. Nach der gesamten Pause-Sequenz kann dann normal weitergedruckt werden.

Ein weiterer Punkt, auf den noch geachtet werden muss, ist der Versatz der Wiping-Linien. Bei mehreren Pausen muss die Y-Position des Wipings immer um ein paar Millimeter versetzt werden, damit nicht verschiedene Linien ineinander gedruckt werden.

2.7.2 Mehrere Arc Layer übereinander

Mit dem Wissen, dass die Ebene der Arc Overhangs meist reibungsfrei gedruckt werden kann, kam die Idee, in der Schicht darüber anstatt normalem Infill eine weitere Schicht der Kreisbögen zu drucken. Das Ziel dabei ist die Stabilisierung des Überhangs, sodass dieser weniger anfällig für Warming und andere Verformungen ist. Für Bauteile, bei denen die Überhangsschicht und die Schicht darüber die gleiche Geometrie haben, kann der G-Code der Arcs vereinfacht kopiert werden mit einer Anpassung der Z-Koordinate. Wenn sich die Überhangsebene zu der darüber unterscheidet, muss ein neuer G-Code mit entsprechenden Arcs generiert werden.

Ein Problem, das bei einer zusätzlichen Schicht der Arc Overhangs entsteht, ist das Aufwärmen der unteren Schicht. Die Auswirkungen sind hier teilweise stärker ausgeprägt, wegen der Besonderheit, dass in der zweiten Schicht Arcs meist die gleichen Druckbewegungen erfolgen, wie in der ersten. Damit werden genau die Kreisbögen an der Stelle erhitzt, an der die verschiedenen Linien nur seitlich aneinandergedrückt sind. Dies sind die Stellen der geringsten Belastbarkeit. Um das zu verhindern, können die beiden Schichten mit unterschiedlichen maximalen Arc-

Radien gedruckt werden. So überschneidet sich die Bahnplanung der Schichten weniger, was das Erwärmen und Absacken des Überhangs verringern kann.

2.7.3 Anpassen der Druckgeschwindigkeit für zusätzliche Arc Layer

In dem Post Processing Script von Wachenschwan gibt es bereits einen Parameter, der über die Druckgeschwindigkeit des Arc Overhangs bestimmt. Hierbei müssen sehr geringe Geschwindigkeiten eingehalten werden, damit das extrudierte Filament genügend Zeit hat, um seitlich eine möglichst robuste Verbindung mit dem vorherigen Arc aufzubauen. Bei Werten von 1-5 mm/Sekunde dauert jedoch der Druck eines Überhangs entsprechend länger als der restliche Druck. Damit die Druckzeit überschaubar bleibt, kann die Druckgeschwindigkeit bei zusätzlichen Arc Layern erhöht werden. Das ist möglich, da im zweiten Arc Layer nicht komplett in der Luft gedruckt wird, sondern auf dem, wenn auch fragilen Layer darunter.

2.7.4 Einfügen von Pausen in zusätzliche Arc Layer

Genau wie bei den Infill-Schichten über dem Arc Layer kann auch eine zusätzliche Schicht Arc Overhangs eine große Hitzeansammlung verursachen. Eine mögliche Verringerung des Problems kann ebenfalls durch das Einfügen von Pausen erfolgen. Dabei werden die Pausen jedoch nicht zwischen den Schichten eingefügt, sondern während der Schicht nach einer bestimmten Anzahl gedruckter Arcs. So kann der Überhang in regelmäßigen Abständen abkühlen und aushärten. Die Wartezeit ist dabei genau so aufgebaut, wie die zuvor beschriebene Pause (siehe Kapitel „2.7.1 Druckpause zum Abkühlen“).

2.7.5 Hilbert Kurve mit alternierender Richtung

Unabhängig davon, wie viele Schichten der Arc Overhangs übereinander erfolgen, sollte in den darüberliegenden Infill-Schichten immer noch ein Fokus darauf liegen, eine mögliche Wölbung zu vermeiden. Im Post Processing Script ist dafür bereits die Methode vorhanden, in einem Layer das Infill-Muster mit der Hilbert Kurve zu ersetzen, um die innere Spannung durch eine ungleichmäßige Abkühlung zu reduzieren. Diese Methode nutzt die gleiche Idee, mit dem Unterschied, dass nicht nur die erste Schicht über dem Arc Overhang geändert wird, sondern auch mehrere Schichten darüber. Auch hier gilt: Wenn die betrachteten Ebenen die gleiche Form haben (zum Beispiel bei einer in Z-Richtung extrudierten Fläche), kann die Schicht der Hilbert Kurve fast komplett kopiert werden, sonst muss neuer G-Code dafür erstellt werden. So wird verhindert, dass ein normales Infill in den Schichten über dem Überhang im Bauteil eine Wölbung verursacht. Als Zusatzfunktion kann in jeder zweiten Schicht das Infill-Muster um 90° gedreht werden, sodass mehr Querverbindungen entstehen, die das Bauteil robuster machen.

2.7.6 Kleinere Methoden

Zuletzt kommen noch eher simplere Funktionen, die den Druck nur wenig beeinflussen, sondern mehr für eine bessere Lesbarkeit des Codes sorgen oder den ganzen G-Code auf Fehler prüfen.

Dafür werden die einzelnen Layer in einer Methode durchnummeriert, da der G-Code schnell unübersichtlich werden kann, wenn dieser von einem Menschen gelesen wird. Hier dient die Z-Höhe und die Nummer des Layers als grobe Orientierung, wo man sich im G-Code befindet.

Dann gibt es noch weitere Funktionen, die als Hilfsfunktionen für andere Methoden gelten. So kann mit einer Funktion herausgefunden werden, in welchen Layern überall Arc Overhangs vorkommen oder was die Z-Koordinate des aktuellen Layers ist.

Da mit den neuen Methoden vieles am G-Code geändert wird, kann es vorkommen, dass in einigen Fällen bestimmte Regularien nicht mehr eingehalten werden. Eine davon ist zum Beispiel der Ausgleich der Retractions und Primings. Der Rückzug von Filament kommt praktisch bei jeder Bewegung vor, bei der nicht gedruckt wird. Damit ist gewährleistet, dass kein Stringing vorkommt, wenn der Druckkopf zu einer anderen Stelle des Bauteils fährt. Somit sind Retractions sehr häufig im G-Code eines Druckes zu finden. Aber für jeden Einzug des Filaments muss im Anschluss, also nach der Bewegung, das Filament wieder vorgeschoben werden, damit weitergedruckt werden kann. Wenn dieser Befehl nicht vorhanden ist, versucht der Drucker den Druck fortzusetzen, jedoch wird die ersten paar Zentimeter kein Material extrudiert. Das merkt der Drucker aber nicht und setzt den Druck ganz normal fort, was zu Unterextrusion und weiteren Druckfehlern führt. Das gleiche kann auch andersherum passieren, wenn die Retraction fehlt und das Priming dafür aber vorhanden ist. Dann wird die Menge an Filament (häufig 3-5 mm) zu viel extrudiert, was in einer Überextrusion resultiert und einen „Tropfen“ an Material zurücklässt. Da durch die anderen Methoden viele Schichten oder Teile davon ersetzt, gelöscht oder verschoben werden, können solche Fehler durchaus vorkommen. Dafür kann eine weitere Methode den G-Code am Ende noch analysieren und genau die genannten Retraction-Fehler detektieren. Dabei wird ebenfalls direkt bewertet, welche Zeilen fehlerhaft sind und welche davon gelöscht werden müssen. Die Liste an Zeilennummern wird dann weitergegeben an eine Funktion, die in umgekehrter Reihenfolge die Zeilen löscht. Das passiert also von hinten nach vorne, weil sich dann nicht alle Zeilennummern verschieben, wenn ganz vorne eine Zeile gelöscht wird.

2.8 Softwarelösung

Die Realisierung der Methoden geschah zuerst manuell durch Umschreiben des G-Codes per Hand. Mit zunehmender Komplexität wurde das jedoch immer unübersichtlicher, was auch der Grund für die Software-Alternative ist, die automatisch mit den genannten Methoden den Code verändert. Die Programmiersprache Python bietet sich besonders gut für die Bearbeitung von G-Code an, da sie eine übersichtliche Syntax hat und den Umgang mit Dateien vereinfacht. Durch die verfügbaren Bibliotheken lassen sich Daten gut einlesen und verändern, was

gerade bei großen G-Code-Dateien vorteilhaft ist. Außerdem ist Python auf verschiedenen Plattformen nutzbar und ermöglicht dadurch eine flexible Anwendung der Skripte ohne größere Anpassungen.

Nach dem Import der benötigten Bibliotheken, liest das Skript als erstes eine G-Code Datei ein und speichert den Inhalt in einer Variable ab. Diese Variable ist eine Liste von Listen. Die Übergeordnete Liste unterteilt den ganzen G-Code in die unterschiedlichen Layer. Das bedeutet, dass jeder Eintrag der Liste den Inhalt von einem einzigen Layer beinhaltet. Und jeder Layer ist ebenfalls eine Liste, die den G-Code einer einzelnen Zeile als Eintrag beinhaltet. So ist die Datei übersichtlich unterteilt und lässt sich besser bearbeiten.

Im nächsten Teil werden die Funktionen definiert, die zuvor als Methoden vorgestellt wurden. Diese sind möglichst unabhängig voneinander geschrieben, damit der Einsatz flexibel für verschiedene Zwecke erfolgen kann. Zuletzt werden die Funktionen in richtiger Reihenfolge aufgerufen und ausgeführt. Das verändert die ursprüngliche Variable. Mit dem Exportieren der Variable in eine neue G-Code-Datei ist das Verändern des G-Codes abgeschlossen.

Es wird in diesem Python Skript nicht der G-Code von der Slicing Software umgeschrieben, sondern der mit Arc Overhangs versehene G-Code vom Post Processing Script. Die neue Python Datei mit den hinzugefügten Methoden stellt somit ein Post Post Processing Script (PPPS) dar. Das komplette Python Skript ist im Anhang zu finden.

2.9 Vorstellung der Ergebnisse

In der Versuchsreihe wurden verschiedene Drucke angefertigt, die sich alle durch verschiedene Einstellungen, Parameter und Methoden unterscheiden. Diese Parameterstudie umfasst zu viele Varianten, um alle in dieser Ausarbeitung zu analysieren und zu bewerten. Es werden daher nur die besonders aussagekräftigen der über 80 gemachten Drucke betrachtet. Alle Drucke wurden jedoch gründlich untersucht und ausgewertet, um aussagekräftige Schlüsse zu ziehen.

Im Folgenden werden die ausgewählten Beispiele in zeitlich chronologischer Reihenfolge vorgestellt, um den Gedankenprozess und die getroffenen Entscheidungen zu verdeutlichen.

2.9.1 V4

Version 4 der Testdrucke ist eine der ersten, die überhaupt druckbar sind. Zuvor waren noch einige Einstellungen nötig, um eine Chance auf einen erfolgreichen Druck zu ermöglichen. Außerdem waren kleine Änderungen für die Nutzerfreundlichkeit nötig, wie zum Beispiel das Anpassen des Start-G-Codes. Dieser wird zwar automatisch vom Slicer erstellt und enthält alle auch Vorbereitungen für den Druck, kann jedoch bei Bedarf überschrieben werden. So beginnt der Standard-G-Code mit der Homing-Sequenz des Druckers. Das ist die Kalibrierung, die obligatorisch vor jedem Druck erfolgt und dem Drucker zu erkennen gibt, wo sich der Extruder im Druckbereich

befindet. Danach folgt das Aufheizen des Extruders und des Druckbettes, denn der Druck kann erst starten, wenn die gewünschte Temperatur erreicht ist. Wenn diese beiden Befehle jetzt getauscht werden, passiert das Aufheizen während der Homing-Sequenz, was in jedem Druck etwa eine Minute Zeit einspart. In den folgenden Bildern 27 bis 30 ist der Testdruck von verschiedenen Seiten zu sehen.

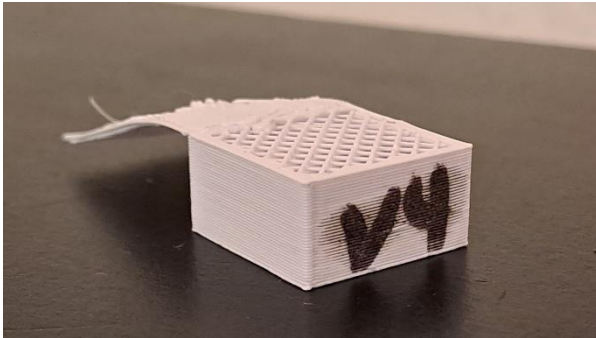


Abbildung 27: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven

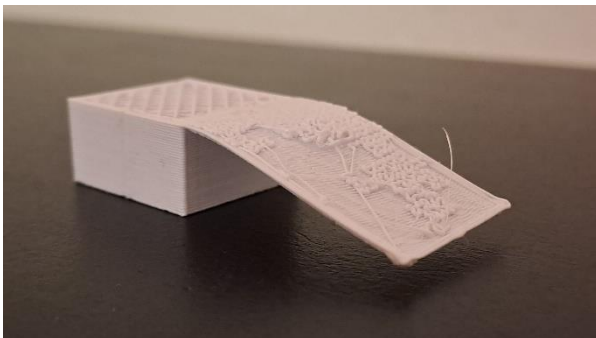


Abbildung 28: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven

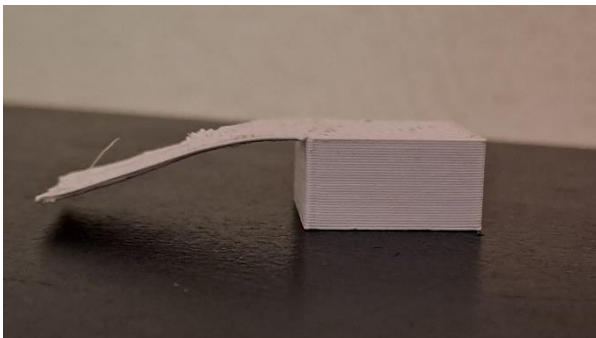


Abbildung 29: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven

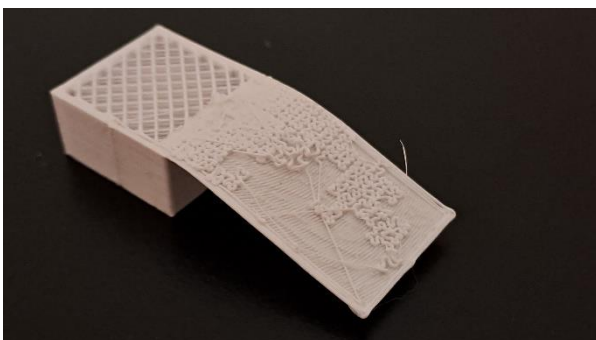


Abbildung 30: Druckversuch V4 aus verschiedenen Perspektiven

Man kann erkennen, dass der Druck des Fußes noch ohne weitere Probleme erfolgte und eine ausreichend gute Oberflächenqualität aufweist. In Bild 28 und Bild 30 ist seitlich die Naht in Z-Richtung erkennbar. Diese befindet sich dort, wo die Konturlinie anfängt bzw. aufhört und zur nächsten Schicht wechselt. Da kein Zusammenhang zu den Arc Overhangs besteht, wird dieses Phänomen nicht weiter betrachtet. Was in den Abbildungen nicht zu sehen ist, ist das Gelingen der Arc Overhangs. In der Ebene des Überhangs wurden die Kreisbögen ohne Probleme aneinander gedruckt, mit einer Geschwindigkeit von 1,5 mm/Sekunde. Der ganze Überhang benötigte etwa eine Stunde Druckzeit. Allerdings ist an der Kante, an der die Kreisbögen jeweils enden, eine geringe Form von Warping zu erkennen. Bei der Kontur im gleichen Layer wie die Arc Overhangs zeigten sich schon erste Anzeichen von Verformungen der Ebene nach unten. Die ersten Teile des Hilbert-Kurven-Infills wurden noch einigermaßen richtig gedruckt, bis sich dann der ganze Überhang nach unten durchbog. Das passierte, als ein größerer Teil der Hilbert Kurve im Fuß-nahen Bereich gedruckt wurde. Mit einer Extrudertemperatur von 210 °C und einer längeren Zeit an der gleichen Stelle hat sich die Überhangsschicht zu sehr aufgewärmt und ihre Festigkeit verloren. Der Druck wurde abgebrochen, weil er keine Grundlage für eine erfolgreiche Fortsetzung bietet.

Bewertend ist die erste gedruckte Version ein Erfolg für die überraschend gute Qualität der Arc Overhangs. Die Voreinstellungen von Drucker, Slicer und PPS in Kombination bieten einen ausgeglichenen Start, um die Parameterstudie zu beginnen. Die aufgezeigten Probleme gilt es nun zu beheben.

Die Anpassungen, die nach diesem Druck gemacht werden sollen im Wesentlichen, verhindern, dass der Überhang zu warm und instabil wird. Das kann zum Beispiel mit einer geringeren Infill-Dichte der Hilbert Kurve im ersten Infill Layer erreicht werden. Durch die 100 % Dichte braucht der Drucker relativ lange für diese Schicht. Je schneller diese Schicht fertig ist, desto weniger Hitze kann in die Arc Overhangs einfließen. Mit diesem Gedanken wurde für die nächsten Versuche auch die Druckgeschwindigkeit des Infills und der Kontur erhöht.

2.9.2 V12



Abbildung 31: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven

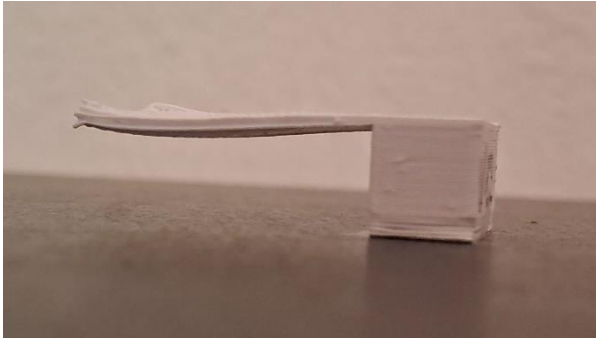


Abbildung 32: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven

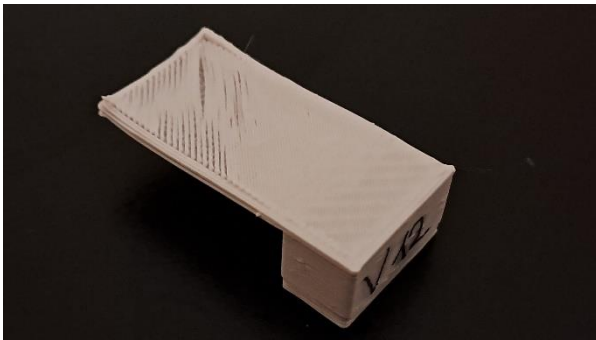


Abbildung 33: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven



Abbildung 34: Druckversuch V12 aus verschiedenen Perspektiven

In den Bildern 31 bis 34 ist die Version 12 der Testreihe aus verschiedenen Perspektiven zu sehen. Im Vergleich zu V4 ist hier sofort erkennbar, dass ein leicht verändertes 3D-Modell genutzt wurde. Der wesentliche Unterschied liegt dabei in der reduzierten Länge des Fußes des Bauteils. Das spart Zeit und beeinträchtigt nicht den Druck des Überhangs. Das Drucken der Arc Overhangs hat sich nur in einem Parameter verändert, nämlich der Überlappung am Ende der Arcs. Hier war zu beobachten, dass das Ende jedes Kreisbogens mit dem vorherigen überlappend ist, was in den Versionen davor für leichtes Warping gesorgt hat. Dieses Phänomen ist steuerbar durch den Parameter „ExtendArcDist“ im PPS. Dieser kann erhöht werden für eine bessere Verbindung zwischen Arcs, begünstigt dabei jedoch auch das Warping an dieser Kante. Da keine Verbindungsprobleme bei den Arcs festgestellt wurden, wurde dieser Parameter von 1 mm auf 0 gesetzt. Weiterhin ist sehr schnell zu sehen, dass der Überhang durch Erwärmung nicht nach unten gesackt ist. Der Grund dafür ist vermutlich die Temperaturreduktion von 210 °C auf 200 °C. Das war die einzige große Veränderung zwischen V4 und V11, und zwischen V11 und V12 gibt es in dem Kriterium keine

Unterschiede. V11 ist zwar der erste Druck ohne heruntergebogenen Überhang, zeigt aber noch andere negative Effekte.

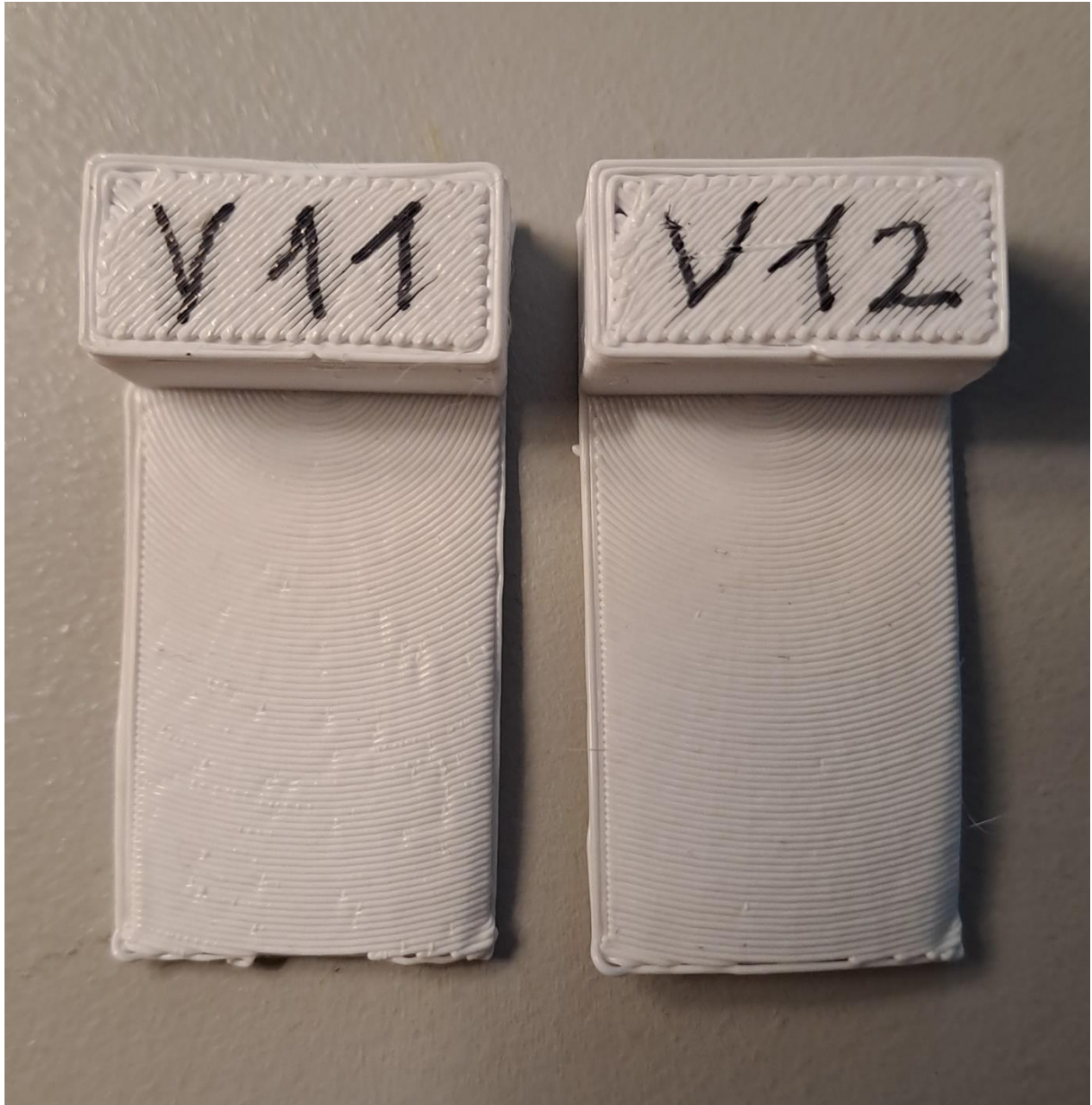


Abbildung 35: Direkter Vergleich der Oberflächenqualität von V11 und V12

Die Abbildung 35 zeigt einen direkten Vergleich der Überhangsoberfläche von V11 und V12. Die Oberflächenqualität unterscheidet sich in erster Linie durch einige Unebenheiten, die bei V11 zu sehen sind, aber nicht bei V12. Der Grund dafür ist das veränderte Infill. Nicht nur wurde die Dichte von 100 % auf 50 % reduziert, sondern auch die Geschwindigkeit wurde von 10 mm/Sekunde auf 60 mm/Sekunde erhöht. Dies bewirkt eine geringere Zeit, in der die Hilbert Kurve in einem kleinen Bereich gedruckt wird. In V11 sorgte das langsame Drucken des Infills für einzelne Punkte, die besonders warm wurden und dann eine leichte Beule nach unten bildeten. Diese sind in der neueren Version nicht mehr zu erkennen. Außerdem wurde die Geschwindigkeit des obersten Layers verändert, also eine Ebene über der Hilbert Kurve. In V11 ist aufgefallen, dass die Arc Schicht und die Hilbert Schicht mit verhältnismäßig wenig

Warping gedruckt wurden, erst in der dritten und obersten Schicht tritt dieses Phänomen auf. Das liegt an den langen Linien des soliden Infills, die in Abbildung 33 zu sehen sind. Diese neigen extrem zu thermischen Kontraktionen, besonders wenn die Druckgeschwindigkeit relativ langsam bei 3 mm/Sekunde liegt. Damit braucht das Drucken der Ebene so lange, dass nicht nur die Ebene darunter schon vollständig abgekühlt ist, sondern auch Teile der eigenen Ebene, während diese noch gedruckt wird. Das führt zu den Verformungen, die in der Version 11 zu sehen sind. Mit dem Versuch, die Druckzeit in einer Ebene durch höhere Geschwindigkeit zu verkürzen, kam jedoch das Problem auf, dass die Oberfläche des Bauteils nicht mehr vollständig und lückenlos gedruckt werden konnte. Bei dieser Ebene von V12, die mit 60 mm/Sekunde gedruckt wurde, ist erkennbar, dass das Material nicht ausreichend Zeit hat, um eine feste Verbindung mit der Ebene darunter aufzubauen. Zusätzlich ist die Kontaktfläche zur Schicht darunter verringert, da die Hilbert Kurve mit der geringeren Infill-Dichte ebenfalls lückenhafter ist. Das führt zu unregelmäßigem Materialfluss, wodurch die sehr gut erkennbaren Lücken entstehen. Zuletzt ist eine deutliche Wölbung des Überhangs nach oben immer noch zu sehen.

Dieses Bauteil wird ebenfalls als teilweiser Erfolg eingeschätzt, da die Probleme, die Version 4, geprägt haben größtenteils behoben wurden. Die Ebene biegt sich nicht so stark nach unten, dass der Druck abgebrochen werden muss. Auch konnte die Qualität der Arc Overhang Oberfläche durch geringere Infill-Dichte und höhere Geschwindigkeit sichtbar verbessert werden, im Vergleich zu Version 11. Die Herausforderungen, die mit diesem Druck erkenntlich wurden, können nun durch weitere Maßnahmen behoben werden.

Das hauptsächliche Problem stellt hier das Warping des Bauteil-Endes nach oben dar. Und es wird immer deutlicher, dass die Lösung dafür nicht trivial ist, da mit einer höheren Geschwindigkeit, einer geringeren Drucktemperatur und intensiverer Kühlung das Warping sehr begünstigt wird. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr, dass mit einer geringeren Geschwindigkeit, einer höheren Drucktemperatur und weniger Kühlung das Bauteil so weit erhitzt wird, dass die Festigkeit nachlässt und der Überhang nach unten sackt. Es gibt somit keine Lösung, die eine eindeutige Richtung hat, vielmehr ist das genaue Mittelmaß zwischen zwei Extremen gefragt, das keines dieser beiden Probleme verursacht. Das ist eigentlich nicht ungewöhnlich, da es bei jeder Druckeinstellung einen Richtwert gibt und bei der Wahl einer viel höheren oder viel tieferen Einstellung, meist auch Probleme auftauchen. Die Herausforderung ist hier, dass dieser Toleranzbereich bei Arc Overhangs sehr viel kleiner ist. Es geht zum Beispiel nicht um einen Temperaturbereich wie bei PLA von 180 bis 230 °C, sondern schon die Temperaturveränderung von 200 °C auf 210 °C kann entscheiden, ob der Druck abgebrochen werden muss oder erfolgreich beendet werden kann.

2.9.3 V28

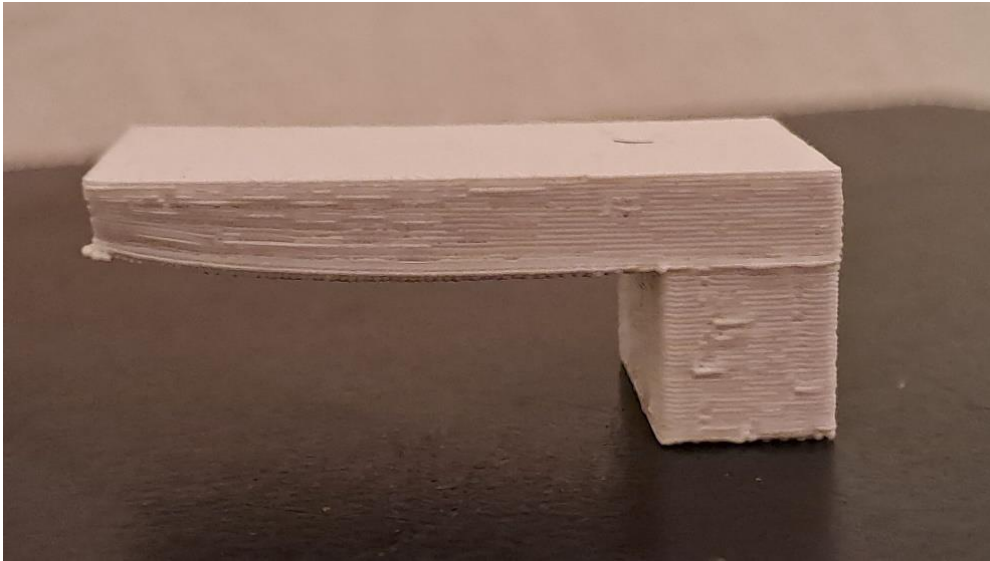


Abbildung 36: Druckversuch V28 aus verschiedenen Perspektiven

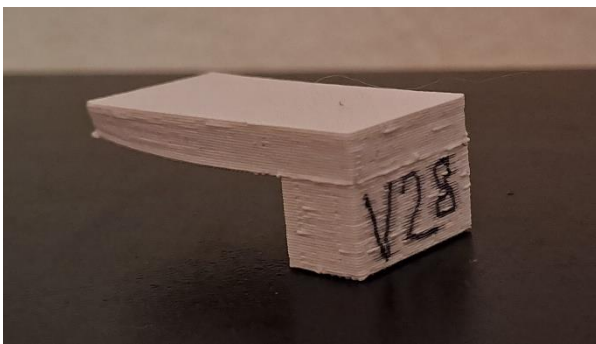


Abbildung 37: Druckversuch V28 aus verschiedenen Perspektiven

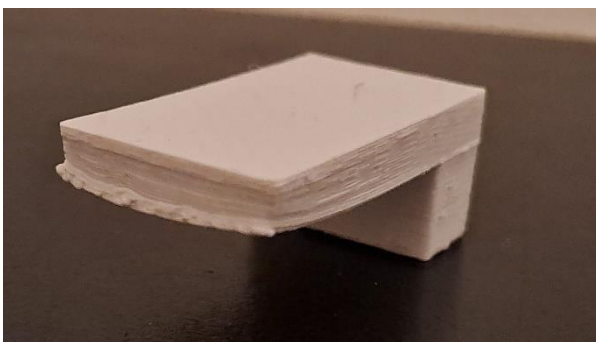


Abbildung 38: Druckversuch V28 aus verschiedenen Perspektiven

In Abbildungen 36 bis 38 ist das Modell V28 zu erkennen. Auch hier ist ersichtlich, dass ein anderes Modell gedruckt wurde als zuvor. Es unterscheidet sich nur in der Dicke des Überhangs, die zuvor 3 Schichten dick war und nun einen Zentimeter beträgt. Das liegt an den zuvor festgestellten Problemen und der hiermit erfolgenden Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Auftreten von Warping und der Anzahl Schichten über den Arc Overhangs. In vorherigen Versuchen war eine Wölbung des Bauteils häufig deutlich mit dem Druck der obersten Schicht zu erkennen. Das liegt daran, dass diese eine Dichte von 100 % hat und nur aus geraden, langen und parallelen Linien

besteht, die sich besonders stark zur Bildung einer Wölbung neigen. Das geschieht umso mehr, wenn die Schichten darunter relativ flexibel sind und eine geringe Biegefestigkeit aufweisen. Es passiert auch, wenn die oberste Schicht nur eine Ebene über den Arc Overhangs gedruckt wird. Mit dem neuen Modell sollen zuerst ein paar Schichten regulärer Infill gedruckt werden, bevor der massive Top-Layer folgt, damit eine ausreichende Stabilität vorhanden ist, um die Bauteilverformung zu verhindern. In gewisser Weise hat das in diesem Versuch auch funktioniert. Es ist erkennbar, dass die oberste Schicht gedruckt wurde, ohne sich selbst oder das komplette Bauteil zu wölben. Das liegt an der beschriebenen Stabilität, die der Überhang nun vorweist. Es ist trotzdem eine Wölbung zu sehen, jedoch nur durch die unteren Schichten, also denen über dem Arc Overhang, was in Abbildung 36 gut zu sehen ist. Dieser Versuch ist innerlich ebenfalls etwas anders aufgebaut: Es folgt nach der Überhangsschicht keine Hilbert Kurve als Infill-Muster, sondern ein Karo-Muster. Das Karo-Muster wurde trotz der Neigung zur Wölbung ausgesucht, da zuvor Probleme bei der Haftung zwischen der Überhangsebene und der Ebene darüber auftauchten. Hier konnte die Hilbert Kurve mit den kurzen Linien, die zusätzlich noch regelmäßig unterbrochen werden, keine gute Verbindung mit ausreichender Kontaktfläche herstellen. Deshalb wurde bei diesem Test mit einem anderen Füllmuster untersucht, ob mit langen Linien der geringe ausübbarer Druck gegen die Arc Overhangs ausreicht, um eine gute Haftung zu erhalten. Dies wurde bestätigt, jedoch mit dem zu erwartenden Auftauchen einer Wölbung.

Dieser Versuch gibt also wichtige Erkenntnisse zurück und eröffnet neue Lösungswege für weitere Drucke. Auch wenn eine direkte Verbesserung nicht klar ersichtlich ist, oder zu anderen Druckfehlern führt, können hier besser die Ursachen für einige Probleme festgestellt werden. Darunter fällt der Einfluss des Infills bzw. der obersten Schicht auf die Wölbung des Bauteils. Ebenso zählt das Haftungsvermögen von verschiedenen Infillmustern dazu.

Mit diesen Erkenntnissen kann darauf geschlossen werden, dass ein gewisser Abstand zwischen Überhangsebene und solider oberer Ebene von Vorteil ist, um einen Faktor der Wölbung zu minimieren. Ebenfalls kann man sagen, dass mit einem Infill-Muster, das lange und gerade Linien beinhaltet, ein besserer Halt aufgebaut werden kann. Das ist jedoch keine Option für das Infill-Muster über den Arc Overhangs, da es eine zu große Wölbung verursacht. Eher geht die Tendenz zur Hilbert Kurve, die dann jedoch gerade so langsam gedruckt werden muss, dass sie noch nicht das Material unter sich aufschmilzt und doch ausreichend Zeit hat, um auf den Arc Overhangs zu haften.

2.9.4 V35

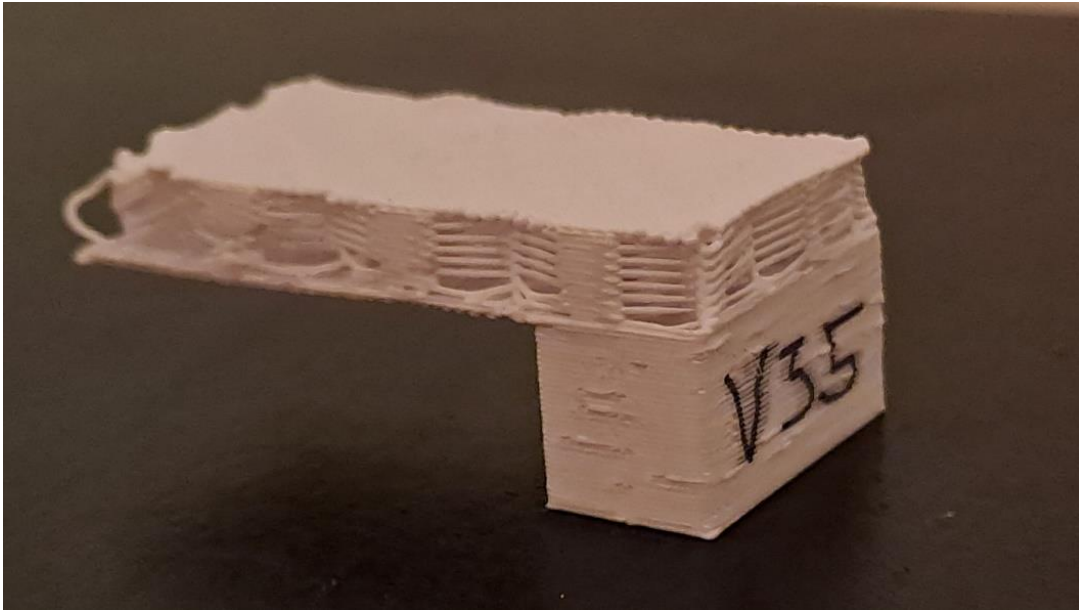


Abbildung 39: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven

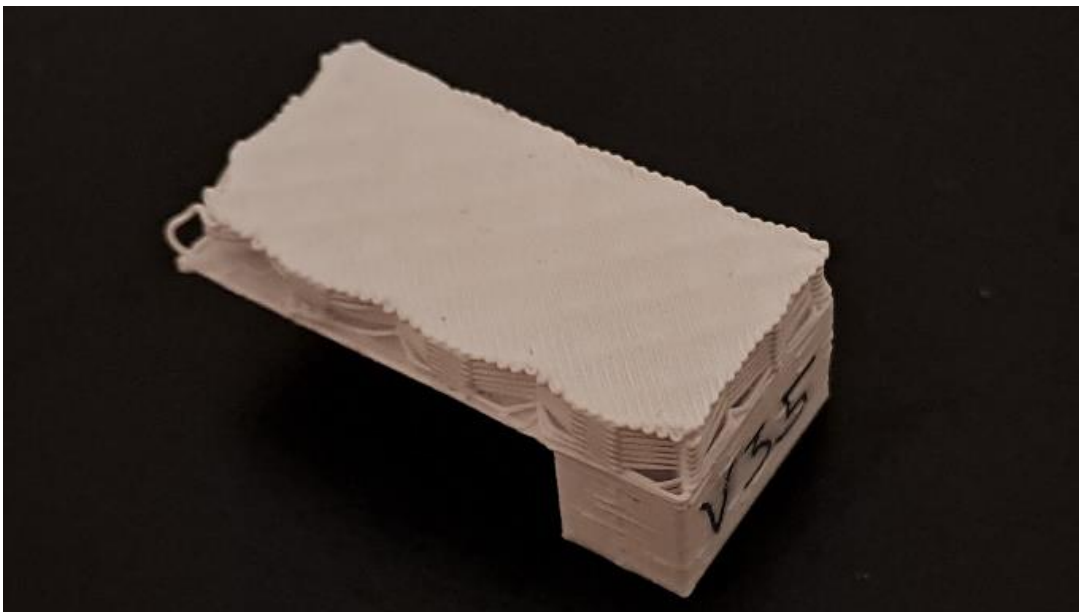


Abbildung 40: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven

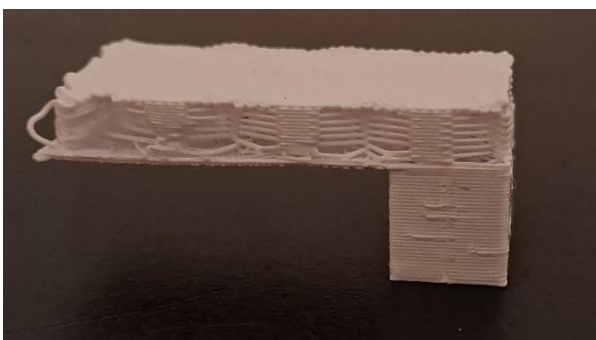


Abbildung 41: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven

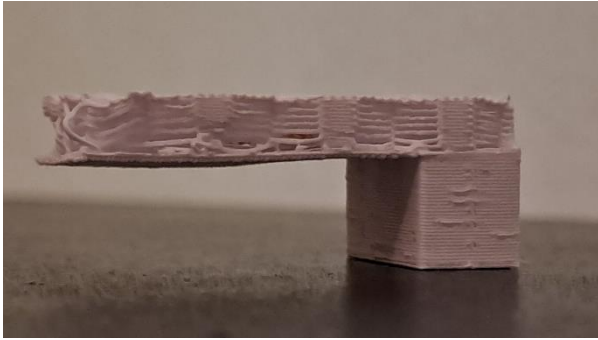


Abbildung 42: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven

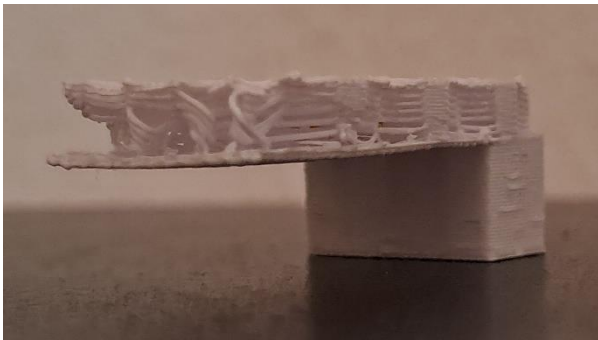


Abbildung 43: Druckversuch V35 aus verschiedenen Perspektiven

Der Versuch 35, zu sehen in den Abbildungen 39 bis 43 sollte folgende Fragestellung untersuchen: Welchen Einfluss haben Infill und Kontur auf die Wölbung des Bauteils? Dafür wurden aktiv im G-Code die Perimeter, also die äußere Kontur weggelassen. Die Arcs wurden gedruckt, wie auch bei den letzten Drucken und die Hilbert Kurve direkt darüber hatte in diesem Versuch nur eine Dichte von 20 %. Alle Layer darüber sind mit 10 % dichtem Karo-Infill gedruckt worden mit der Besonderheit, dass keine Außenkonturen vorhanden sind. Das sieht natürlich auf dem ersten Blick nach einer sehr schlechten Oberfläche aus, ist aber gewollt und zeigt eine interessante Eigenschaft. Weder ist hier eine deutliche Verformung nach unten wegen zu großer Hitze zu sehen noch eine Wölbung nach oben. Besonders letzteres lässt darauf schließen, dass ein großer Teil der auftretenden Wölbungen durch die Konturen entstehen. Die Konturen können auch nicht einfach weggelassen werden, da bei den meisten richtigen Drucken die Außenwand notwendig für Funktion und Ästhetik ist. Eine davon unabhängige Kleinigkeit betrifft die Oberflächenqualität des obersten Layers. Es ist das Infill durch die solide obere Schicht zu sehen (siehe Abbildung 40), was jedoch keinen Zusammenhang mit Arc Overhangs hat, sondern nur daran liegt, dass die Infill-Dichte so gering ist und es nur einen soliden obersten Layer gibt. Das Problem hat keine große Relevanz, da es durch das Hinzufügen eines weiteren soliden Layers behoben werden kann und nicht durch die Arc Overhangs beeinflusst wird.

Dieses Experiment entfernt sich etwas weiter vom perfekten Druck mit Arc Overhangs, ist aber dennoch relevant für das Erforschen der auftretenden Phänomene. Durch Versuche wie diesen können Probleme gezielter auf bestimmte Ursachen zurückgeführt werden, was die Fehlerbehebung erheblich vereinfacht.

Da das Entfernen der Konturen nicht möglich ist, muss die Außenschicht anders gedruckt werden. Hierfür kann der Versuch gemacht werden, ob die Konturen eher in

einer langsamen Geschwindigkeit gedruckt werden sollten, um Formtreue und ausreichend Haftung zu gewähren oder ob bei einer höheren Geschwindigkeit die geringe Haftung dafür sorgt, dass die thermischen Kontraktionen sich nicht in Form von Warping bemerkbar machen.

2.9.5 V41

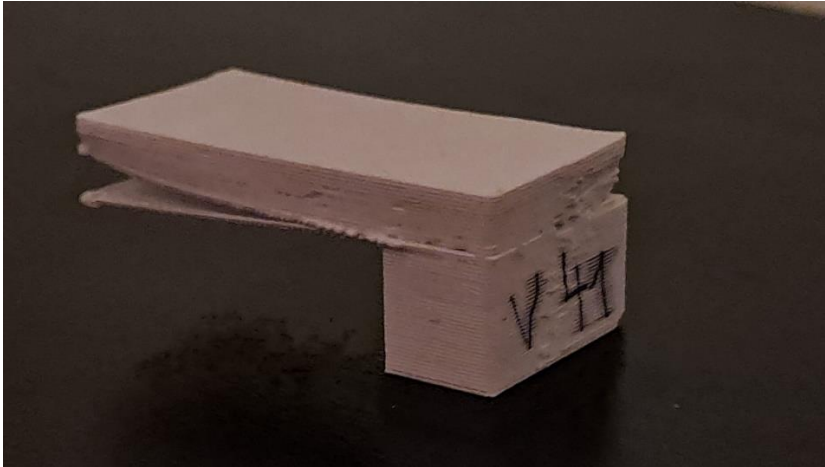


Abbildung 44: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven

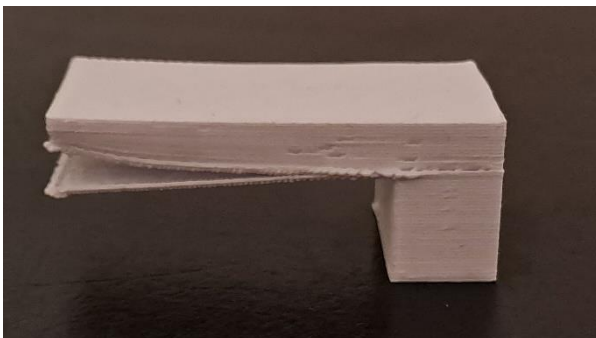


Abbildung 45: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven

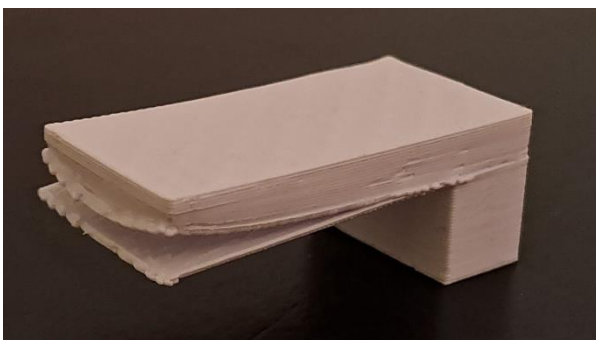


Abbildung 46: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven

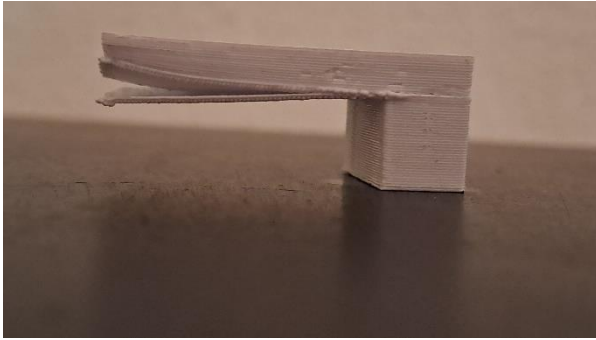


Abbildung 47: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven

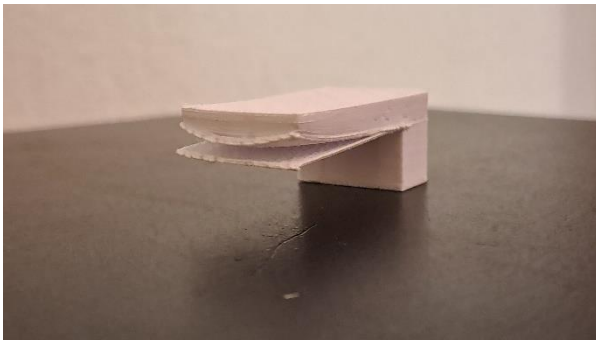


Abbildung 48: Druckversuch V41 aus verschiedenen Perspektiven

V41 ist eine der ersten Versionen, die mit einer neuen Methode gedruckt wurden. Hier wurden zwei Schichten von Arc Overhangs übereinander gedruckt. Das sollte testen, ob damit die Verformungsprobleme der vorherigen Drucke behoben werden. Es wurde bei fast allen Drucken festgestellt, dass die Ebene der Arc Overhangs meist ohne Probleme gedruckt werden kann und keine Anzeichen von Druckfehlern hervorbringt. Die negative Eigenschaft, die diese Ebene jedoch mit sich bringt, ist die mangelnde Stabilität. Sie reicht gerade so aus, um sich unter dem Eigengewicht nicht zu verbiegen. Gegen zusätzliche äußere Kräfte ist jedoch kein Widerstand möglich. Mit einer zweiten Schicht, die identisch oder ähnlich aufgebaut ist, könnte die nötige Stabilität erreicht werden, um normal weiter zu drucken. Wie in den Abbildungen 44 bis 48 zu sehen ist, ist dies nicht ganz der Fall. Zu sehen ist sowohl das Absacken der unteren Ebene nach unten als auch das Wölben der oberen Ebene nach oben. Weil mit dieser Methode in der zweiten Schicht genau die gleichen Bahnen gedruckt werden wie in der Ebene darunter, gab es schon die Vermutung, dass dieses Problem auftauchen kann, nur ist es später als gedacht aufgetaucht. Die ersten paar Arcs des zweiten Arc Layers können ohne Probleme gedruckt werden: Die Haftung der Ebenen sieht gut aus und keine Verformungen treten auf. Erst ab dem ersten vollständigen Halbkreis über die komplette Breite des Bauteils war der Wärmeeinfluss zu groß und der untere Arc Layer ist durchgebogen. Dadurch hatten die beiden Arc Layer keinen Kontakt mehr, was das Ziel von höherer Stabilität verfehlt. Da die Bögen jedoch selbst-stabilisierend sind, konnte weitergedruckt werden. Ab dem ersten Layer Infill direkt darüber entstand jedoch wie erwartet die Wölbung, die es zu vermeiden galt. Bei der Analyse und besonders in Abbildung 44 fällt auch auf, dass die Außenkonturen in den Schichten oberhalb des Überhangs Lücken aufweisen. Die Ursache dafür zu finden erforderte einen detaillierten Blick in den G-Code. Hier konnten mehrere Retractionfehler gefunden werden, die sich direkt vor dem Perimeter befanden. Das kam durch die

Nutzung der neuen Methoden, die große Teile des Codes ersetzt, kopiert oder gelöscht haben. Dabei kann es vorkommen, dass Primings gelöscht werden, aber die Retraction noch im G-Code verbleibt. Dann fehlen die in diesem Fall 5 Millimeter Material beim Drucken und erst ab der Hälfte der Kontur kann wieder normal gedruckt werden. So ist auch in Abbildung 44 zu sehen, dass der Drucker in der Mitte der Stirnseite (über der Beschriftung) beginnt und gegen den Uhrzeigersinn den Umfang der Schicht abfährt.

Dieser Versuch ist der Anfang von einer sehr experimentellen Testphase mit komplexeren Methoden, die nicht direkt auf andere Techniken des 3D-Drucks zurückzuführen sind. Somit sind auch die Ideen für eine Verbesserung häufig nicht einfach begründbar. Dadurch sind einige Drucke mit neuen Methoden nur Versuche, die zeigen sollen, wie sich diese Methoden verhalten und nicht, ob ein direktes Ergebnis erzielt werden kann.

Von hier aus gibt es viele unterschiedliche Ideen, wie weitergemacht werden kann. Eine Idee bestand daraus, die untere Schicht der Arc Overhangs nur bis zu dem Punkt zu drucken, wo in diesem Versuch das Abknicken anfang. Das würde bedeuten, dass der erste Arc Overhang Layer nur ca. einen Zentimeter lang gedruckt wird, und dann wird die vollständige zweite Schicht darüber gedruckt. Somit wäre der Anfang des Überhangs stabil genug, um nicht nach unten zu sacken und es würde nur noch das Problem von Warming auftauchen. Das bringt jedoch eine Formuntreue im ersten Arc Layer mit sich und ist zusätzlich nicht universell übertragbar auf andere Druckmodelle. Eine andere Überlegung zielte darauf ab, in der zweiten Schicht Arcs Pausen einzufügen, damit das Bauteil abkühlen kann. Ebenso kann im zweiten Layer die Druckgeschwindigkeit erhöht werden, da diese nicht komplett in der Luft gedruckt wird, sondern auf einem mehr oder weniger festen Untergrund. Darüber hinaus könnte auch die untere Ebene komplett gedruckt werden, während in der oberen Ebene nur so weit gedruckt wird, bis die benannten Probleme auftreten. Ab dem Punkt ist die Abknickkante des Bauteils stabilisiert und der Rest der Ebene könnte mit einem Infill, wie der Hilbert Kurve gedruckt werden. Damit bleibt die Geometrie erhalten. Für die Ausbesserung der Retractionfehler muss der G-Code nach dem Bearbeiten nochmals auf diese Fehler überprüft werden und die überflüssigen Retractions oder Primings müssen entfernt werden.

2.10 Erkenntnisse

Das Ziel dieser Versuchsreihe ist die Festlegung von einem möglichst optimalen Parametersatz, der als Richtlinie für einen Druck mit Arc Overhangs dienen kann. Anhand der gemachten Testdrucke kann diese Orientierung folgendermaßen zusammengefasst werden:

Die ersten Druckversionen zeigten, dass die Extrudertemperatur auf ca. 200 °C geschätzt werden kann. Die Drucktemperatur hat relativ große Einflüsse beim Druck der Arc Überhängen und den Ebenen darüber. Durch verschiedene Temperatureinstellungen können viele der genannten Probleme auftreten oder verhindert werden. Bei einer zu geringen Drucktemperatur kann die Düse verstopfen oder sehr ungleichmäßig Material extrudieren. Auch kann besonders bei den Ebenen über dem Arc Overhang eine zu schnelle Abkühlung erfolgen, was beim Drucken von

weiteren Schichten in Warping resultiert. Bei einer zu hohen Temperatur wird viel Wärme durch das Bauteil abgeleitet, was zur Verflüssigung von bereits gedrucktem Material führen kann. Dies hat besonders bei großen Überhängen schwere Folgen. So sollte die Temperatur für das Drucken der Arcs eher tendenziell wenige Grad Celsius unter den 200 °C liegen und ab der zweiten Schicht Infill-Struktur können auch etwas über 200 °C eingehalten werden.

Für das Drucken der Überhangsebene müssen die zugehörigen Parameter angepasst werden auf die herrschenden Umstände wie Geometriekomplexität und Überhangslänge. Bei simplen Bauteilen, wie in den Versuchen, kann der Parameter ArcExtendDist auf null Millimeter gesetzt werden, da eine ausreichende Stabilität in der Ebene schon vorhanden ist. Bei besonders großen oder sehr verschachtelten Überhängen kann dieser Wert auch auf bis zu 1 mm erhöht werden, um eine stärkere Verbindung zwischen den einzelnen Kreisbögen zu garantieren. Dabei kann es jedoch dazu kommen, dass sich eine Wölbung an der Kante bildet, wo die einzelnen Arcs enden. Auch der maximale Radius, den die Arcs erreichen können sollte bei komplexeren Geometrien verringert werden, damit die Form der Ebene bestmöglich eingehalten wird und die Druckbarkeit bestehen bleibt. Wenn der maximale Radius verringert wird, sollte auch der Parameter ArcCenterOffset erhöht werden auf wenige Millimeter. Durch die höhere Anzahl von Mittelpunkten für die Arcs sollten diese nicht jedes Mal so klein starten, weil dadurch eine unebenere Oberfläche erzeugt wird.

Die Druckgeschwindigkeit muss auf die aktuelle Druckkategorie angepasst werden. Für normales Infill unabhängig vom Überhang können höhere Geschwindigkeiten von bis zu 60 mm/Sekunde gewählt werden. Bei Außenkonturen muss der Wert geringer sein, um eine qualitativ hochwertige Oberfläche zu erlangen. Beim Drucken der Arcs muss eine sehr langsame Geschwindigkeit eingehalten werden. Mit 1,5 mm/Sekunde wurden in diesen Experimenten sehr gute Ergebnisse erzielt. 5 mm/Sekunde sollten nicht überschritten werden. Die Kontur sollte aus möglichst wenig Linien bestehen und langsam mit Geschwindigkeiten zwischen 10 und 20 mm/Sekunde gedruckt werden. Falls eine zweite Schicht Arc Overhangs erfolgen sollte, kann diese mit höheren Geschwindigkeiten von 20 mm/Sekunde gedruckt werden. Im ersten Infill-Layer ist die aufgeteilte Hilbert Kurve so langsam wie möglich zu drucken, ohne dass die Arcs zu sehr erwärmt werden. Dafür könnten 5 – 10 mm/Sekunde bereits ausreichen. Wenn die Kurve alle 4 – 6 Sekunden neu angesetzt wird, können schon wenige Zentimeter gedruckt werden, bevor an einer anderen Stelle weitergedruckt wird. Die Kontur ist gleichermaßen, wie in der Ebene darunter zu drucken. Das Infill in den folgenden Ebenen sollte die ersten paar Layer auch noch mit geringem Tempo gedruckt werden. Erst wenn ausreichend Ebenen eine genügende Stabilität bieten, kann wieder schneller gedruckt werden.

Die Infill-Dichte der Hilbert Kurve kann ca. 30 – 50 % betragen. Wenn für alle Ebenen über dem Überhang ebenfalls dieses Infill-Muster gewählt wird, sollten die ersten paar Schichten auch mit dieser Dichte gedruckt werden. Erst ab einer bestimmten bauteilabhängigen Ebene kann die Dichte nach Bedarf weiter erhöht werden, um die Stabilität zu verbessern.

Die Kühlung ist beim Druck der Arcs auf 100 % zu setzen, wenn keine Pausen zwischen den Bögen erfolgen, da die Arcs so schnell wie möglich abkühlen sollen. In den Ebenen

darüber sollte dann jedoch auf ca. 10 – 15 % reduziert werden, um ein gleichmäßiges Abkühlen zu ermöglichen.

Zuletzt sind einige Designhinweise zu beachten. Es gibt Bauteile, die mehr oder weniger gut für die Anwendung von Arc Overhangs geeignet sind. Zuerst ist ein Überhang immer so klein wie möglich zu gestalten. Auf große Überhänge wirken dementsprechende große Kräfte und Hebel, die einen erfolgreichen und stabilen Druck gefährden. Auch ist die Form der Überhangsebene ausschlaggebend. Vorteilhaft sind konvexe Geometrien, die im besten Fall noch Rundungen mit dem gleichen Radius beinhalten, wie die Kreisbögen beim Drucken. Abbildung 49 und 50 zeigen ein Beispiel dafür. Dabei sieht man in dem ersten Modell ein abgerundeter Überhang, der den gleichen Rundungsradius hat, wie der Arc an der Stelle:

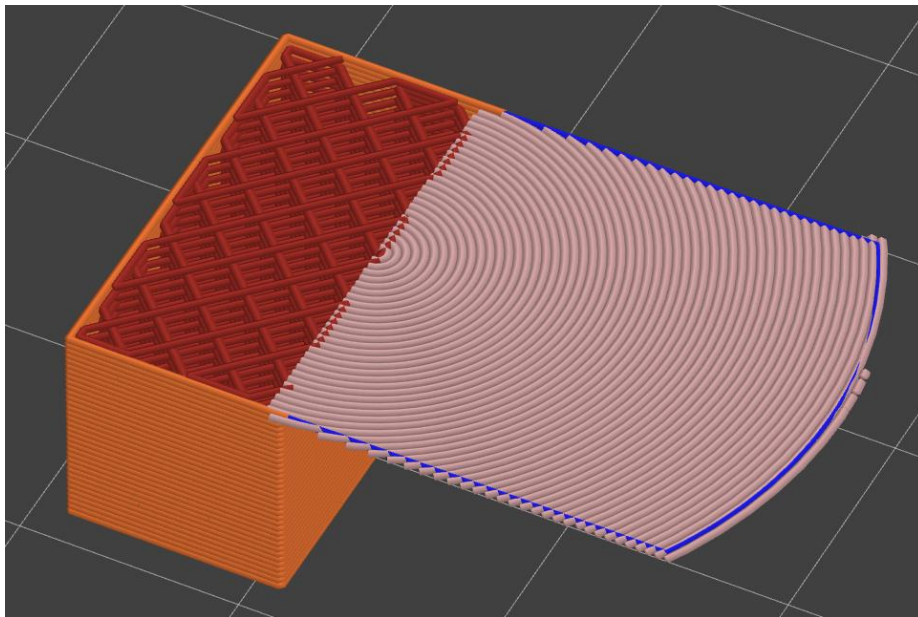


Abbildung 49: Überhangsgeometrie mit Rundung, die an Arcs angepasst ist

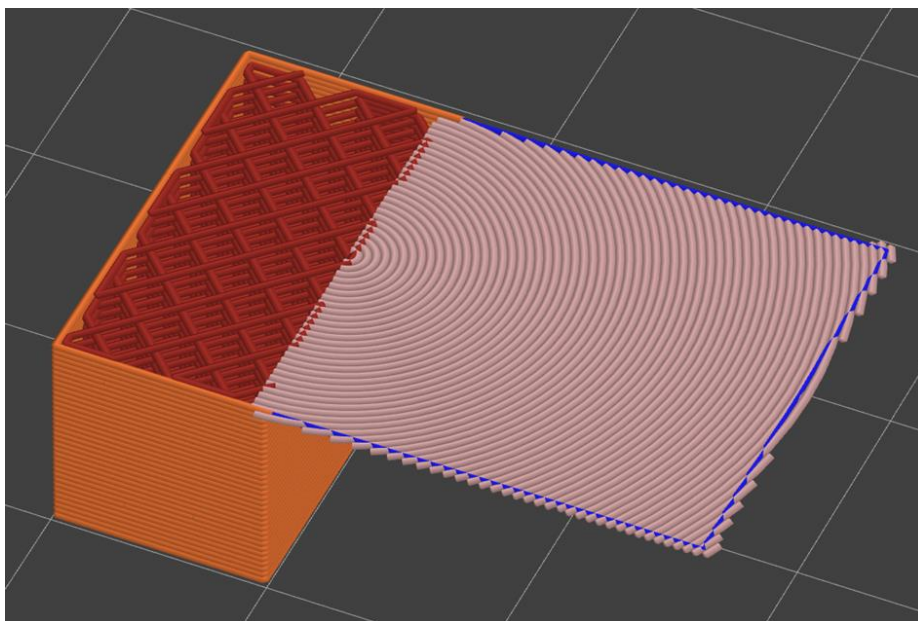


Abbildung 50: Unangepasster Überhang ohne Rundung

In Abbildung 50 ist eine unangepasste Überhangsgeometrie zu sehen. Diese hat nach dem Slicen sehr viele kleinere, fast gerade Linien, um die Ecken auszufüllen. Diese sind schwierig zu drucken, ohne geringe Nachteile in der Druckqualität in Kauf zu nehmen. So kurze Linien tendieren dazu, wegen zu kurzer Druck- und Abkühlzeit keinen guten Halt zum Rest der Arcs aufzubauen. Wenn danach auf diesem warmen Filament weiter gedruckt wird, entstehen Verformungen, die im fertigen Bauteil negativ bemerkbar sind.

Das Bauteil sollte so gestaltet werden, dass wenn Arc Overhangs nötig sind, im Bereich des Überhangs die Maßgenauigkeit und die Oberflächenqualität eher unwichtig sind. Bei Passteilen, die auf den Millimeter genau gedruckt sein müssen, ist von Arc Overhangs abzuraten. So eignen sich Arc Overhang besonders gut für den Druck der Decke in einem hohlen, geschlossenen Teil, da die Oberfläche der Arcs nicht sichtbar ist und die Stabilität und Formtreue durch die Schichten darüber entstehen.

Der Winkel des Überhangs darf die waagerechten 90° nicht überschreiten. Ein extremerer Winkel resultiert beim Slicen in Inseln in der Luft ohne Verbindung zum festen Bauteil, die mit einem waagerechten Slicingverfahren unmöglich zu drucken sind. Überhangswinkel, die kleiner als 90° betragen, sind besser zu drucken, da diese aus mehreren kleineren Überhängen bestehen, die in verschiedenen Z-Schichten und versetzt zueinander liegen. Alle Überhänge unter 45° können auch ohne Arc Overhangs gedruckt werden. So ist nach Möglichkeit ein geringer Überhangswinkel zu wählen.

Wegen der auftretenden Probleme in den ersten paar Testversionen, wie auch in V12 ist ein sehr dünner Überhang stets zu vermeiden. Wenn der komplette Überhang nur wenige Schichten dick ist, ist noch keine genügende Stabilität aufgebaut, um dem Warping zu widerstehen, das durch den soliden Top-Layer entsteht. Es ist zu empfehlen, einige Schichten von normalem Infill zwischen Arc- und Top-Layer zu bewahren.

3 Weitere Forschung und Zukunftsausblick

Es gibt noch viel Raum für Optimierung, wenn es um das Drucken von Arc Overhangs geht. Die bisherigen Versuche zeigen zwar, dass diese Methode viele Vorteile mit sich bringen können, doch die Ausarbeitung ist noch lange nicht abgeschlossen. Gerade bei komplexen Geometrien oder größeren Überhängen stößt das Verfahren aktuell an seine Grenzen. Weiterhin sind andere Umstände, wie die Verwendung von anderem Material oder anderen Drucktechniken noch überhaupt nicht getestet worden. Durch weitere Tests muss noch herausgefunden werden, in welchen Bereichen Verbesserungen am Design oder an den Parametern des Druckverfahrens vorgenommen werden können. Dabei sollte erwähnt werden, dass Technik der Arc Overhangs erst seit einigen Monaten eine bekannte Methode ist, während allgemein der 3D-Druck selbst bereits seit mehreren Jahrzehnten genutzt und verbessert wird. Diese Neuheit erklärt, warum das erhebliche Verbesserungspotenzial noch besteht.

Der folgende Abschnitt befasst sich mit zusätzlichen Überlegungen, die im Rahmen dieser Arbeit aufkamen. Diese betreffen interessante Themen, die nicht im Detail behandelt wurden, sowie Fortführungsvorschläge von Testreihen, die aufgrund des begrenzten Zeit- und Arbeitsaufwands über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Außerdem werden weitere relevante Gedanken vorgestellt, die als Grundlage für weiterführende Forschung dienen könnten.

3.1 Alternative Prüfkörper

Für die beschriebene Testreihe wurde ein Druckmodell erstellt, um möglichst aussagekräftig Qualitätskriterien darstellen zu können. Dabei sollte eine gewisse Komplexität nicht überschritten werden, um unter optimalen Bedingungen einen qualitativ hochwertigen Überhang zu drucken. Für weitere Forschungen sind andere Druckobjekte ebenso interessant. Wenn ein schlichter Überhang hinreichend gut gedruckt werden kann, können fortlaufend komplexere und besondere Modelle behandelt werden. Damit sind beispielsweise Geometrien mit Richtungsänderungen gemeint, wie Abbildung 51 zeigt. Dies ist ebenfalls ein anspruchsvolles Beispiel, das in der additiven Fertigung eine Herausforderung darstellen kann. Eine Testreihe mit diesem Prüfkörper könnte neue Probleme aufzeigen und es können verschiedene innovative Lösungswege dafür entwickelt werden.

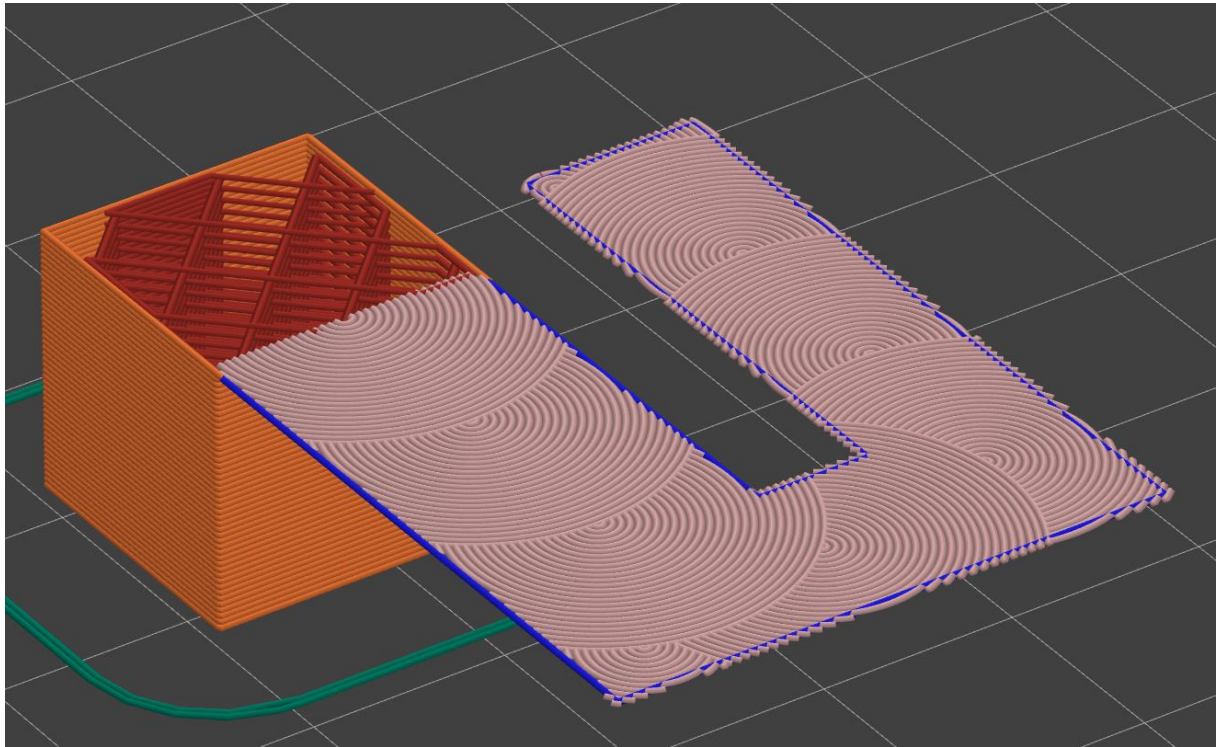


Abbildung 51: Komplexe Überhangsgeometrie mit wechselnder Richtung des Überhangs

Zusätzlich bleibt auch interessant, wie groß und lang ein Überhang maximal druckbar ist. Es ist zu vermuten, dass ein hochskalierter Überhang die beschriebenen Probleme und besonders Warping dementsprechend ausgeprägter aufzeigt. Das würde bedeuten, dass ein maximaler Überhang nicht direkt festlegbar ist, sondern individuell abzuwägen ist. Ein Extremfall dieses großen Überhangs wäre eine spiralförmige Geometrie ohne Querverbindungen.

Ein Beispiel, das viel Anwendung im typischen Gebrauch findet, ist ein Überhang mit einem relativ kleinen Winkel bezogen auf die waagerechte Ebene. Schon mit einer sehr geringen Steigung könnte das Drucken erheblich vereinfacht werden. So wird ein großer Überhang in mehrere kleinere aufgeteilt, die versetzt zueinander gedruckt werden. In der Theorie sollten somit auch extremere Überhänge mit nur wenig Anpassungen druckbar sein, jedoch kommt schon beim ersten Versuch das Problem auf, dass die Bearbeitung durch das Post Processing Script Fehler aufwirft und nur in der ersten Schicht Arc Overhangs generiert. Somit benötigt dieser Prüfkörper ebenfalls noch Arbeit und notwendige Anpassungen mit sich, kann jedoch sehr relevant für die alltägliche Anwendung sein.

Hinzuzufügen ist ein Prüfkörper, der verschiedene Formen von filigranen Beschaffenheiten aufzeigt. Darunter fällt beispielsweise ein Objekt mit einem sehr schmalen Überhang. Bei nur wenigen Millimetern Breite können keine richtigen Kreisbögen gedruckt werden. Es ist wichtig herauszufinden, wie sich die Breite des Überhangs auf die Druckbarkeit auswirkt und welche Grenzwerte nicht unterschritten werden dürfen.

3.2 Alternative Drucker

Im Kapitel 1.3.3 modifizierte und spezielle Drucker wurden diverse Drucker vorgestellt, die mit verschiedenen Eigenschaften hervorstechen. Abgesehen von denen mit Modifikationen ist der Belt-Printer eine interessante Wahl, mit der neue Ergebnisse erzielt werden können. Wie beschrieben können mit einem solchen Modell Überhänge von 0° (senkrecht) bis $+90^\circ$ (waagrecht) gedruckt werden. Mit der Nutzung von Arc Overhangs wäre intuitiv zu vermuten, dass nun ein Druckbereich von -45° bis $+135^\circ$ möglich ist. Das würde auch wieder eine Reihe an Möglichkeiten für die Designfreiheit und Druckbarkeit von komplexen Formen offenlegen. Ob das in der Praxis so umsetzbar ist, muss durch Experimente ermittelt werden.

3.3 Alternatives Filament

Diese Studie ist beschränkt auf eine Art Filament. Es wurde nur PLA genutzt, um einen preislichen Rahmen einzuhalten und den Arbeitsaufwand nicht um das Vielfache zu erhöhen. Dennoch ist es interessant, das Verhalten von Arc Overhangs mit anderen Materialien und den entsprechenden Eigenschaften zu beobachten. Beispielsweise muss ein Material wie Nylon bei sehr viel höheren Temperaturen von $230 - 280^\circ\text{C}$ gedruckt werden, ist jedoch auch wesentlich stabiler als die meisten Filament-Arten. Eine eher ungewöhnlichere Anwendung der Arc Overhangs wäre der Druck mit dem Material TPU. Die Abkürzung steht für thermoplastisches Polyurethan und die Besonderheit des Elastomers ist die gummihafte Flexibilität im abgekühlten Druckobjekt. Dennoch kann die Erforschung dieser Kombination interessante Erkenntnisse bringen.

3.4 Alternative Druck-Arten

Besonders in der Industrie werden häufig auch unterschiedliche Arten des 3D-Drucks genutzt. Fused Deposition Modelling (FDM) Drucker, wie der in dieser Arbeit genutzte, sind sehr beliebt für den privaten Gebrauch als Desktop Printer. In der Industrie haben jedoch selektives Lasersintern und Stereolithografie eine deutlich höhere Relevanz. Somit ist das Drucken der Arc Overhangs mit diesen Druckverfahren ein sehr bedeutendes Thema. Weil sich diese Methoden jedoch deutlich vom FDM-Druck unterscheiden, können keine direkten Schlüsse dafür gezogen werden. Es können lediglich Vermutungen aufgestellt werden, wo mögliche Probleme entstehen können. Beim selektivem Lasersintern wird eine Schicht von feinem Polymer-Pulver von einem leistungsstarken Laser an bestimmten Stellen aufgeschmolzen, sodass ein fester Layer entsteht. Ein Überhang wird hier nicht direkt in der Luft gedruckt, sondern hat noch Pulver unter dem Layer. Das hier auftretende Problem ist die Wärme, die durch den Laser abgegeben wird. Die kann nicht direkt in das Bauteil oder Supportstrukturen abgeleitet werden. So wird die Wärme in das noch nicht geschmolzene Pulver abgeleitet, was dann teilweise schmilzt und eine sehr unschöne Oberfläche erzeugt. Bei der Nutzung von Arc Overhangs würde die Bogen-Struktur nicht nur stabilisierend wirken, sondern auch der seitlichen Wärmeableitung dienen. Das gleiche Prinzip wirkt auch beim Druck mit Stereolithografie, nur dass kein Polymer-Pulver aufgeschmolzen

wird, sondern ein flüssiges Kunststoff-Harz wird mit einem Laser an bestimmten Stellen ausgehärtet, um so einen festen Layer zu erzeugen. In beiden Fällen muss für die Anwendung von Arc Overhangs die Energieverteilung des Lasers und die Eindring-Charakteristik des Harzes oder des Pulvers betrachtet werden.

3.5 Alternative zur Parameterstudie

Eine Parameterstudie ist nicht die einzige Methode, um einen brauchbaren Parametersatz zu ermitteln. Die strategische Versuchsplanung, oder im englischen Design of Experiment (kurz DoE) genannt, beschreibt eine Methode für eine effiziente Analyse der Parameter und deren Einfluss auf das Ergebnis. Anhand dieser Screenings sind Schlussfolgerungen zu treffen, um einen eindeutigen optimalen Parametersatz zu bestimmen. Diese Art von Versuchsplanung reduziert nicht nur möglicherweise die Anzahl der benötigten Versuche, sondern kann ebenfalls mit höherer Sicherheit ein absoluten Optimal-Punkt der Parameter bestimmen. Auch können Faktoren mit großem Einfluss auf Ergebnis-Werte von weniger einflussreichen Faktoren unterschieden werden.

Die zu analysierenden Parameter sind folgend als Faktoren bezeichnet. Die Werte, die für die Versuche eingestellt werden können, werden Stufen genannt. So kann zum Beispiel der Faktor Extrudertemperatur die Stufe hoch (heiß) oder tief (kalt) annehmen.

Um nun das vorhandene Zusammenspiel von Faktoren und den kritischen Qualitätsmerkmalen als Antwort darauf zu untersuchen, wird der Versuchsraum so groß wie möglich, jedoch mit einer ausreichenden Genauigkeit abgebildet. Im Beispiel von zwei veränderlichen Faktoren kann in einem Diagramm der gegebene Versuchsraum abgebildet werden. Abbildung 52 zeigt dies mit den Faktoren Temperatur und Druckgeschwindigkeit. Eingezeichnet sind nur vier Kombinationen dieser beiden Faktoren, die ein möglichst breites Spektrum abdecken und somit Rückschlüsse auf die optimalen Werte ermöglichen. Die vier Versuche beschreiben jede der möglichen Kombinationen von hohen und tiefen Stufen der Faktoren.

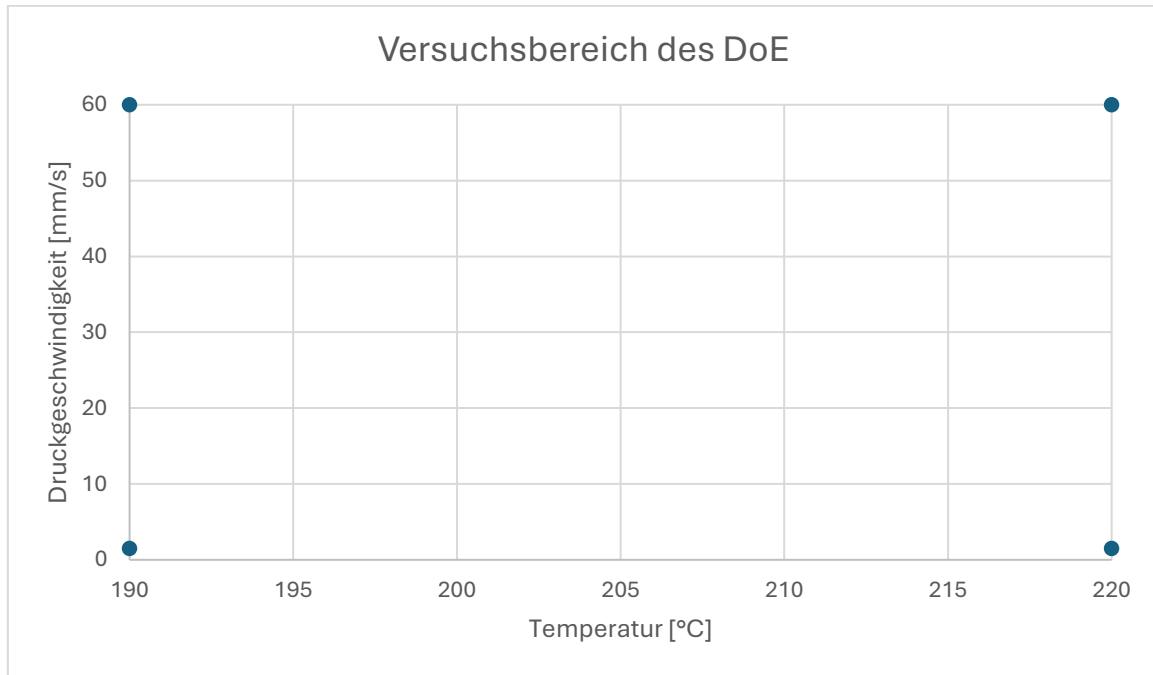


Abbildung 52: Versuchsraum bei der Veränderung von Temperatur und Druckgeschwindigkeit

Um nun ein genaueres Ergebnis zu erzielen, werden von allen vier Versuchen die Antworten ausgewertet und die Qualitätskriterien werden qualitativ mit einem Wert beurteilt. Diese Experimente werden durch weitere Punkte ergänzt, die den verbleibenden Raum des Versuchsgebietes abdecken. Mit der Bewertung dieser Versuche kann dann eine Tendenz festgestellt werden, mit welchen Wertebereichen gute Ergebnisse erzielt werden. Dieser Bereich wird dann weiter aufgelöst, bis ein ausreichendes Optimum erreicht ist.

Diese Methode der Versuchsplanung kann viele Vorteile gegenüber der klassischen Parameterstudie haben. So wird bei der Parameterstudie mit der separaten Veränderung von einzelnen Faktoren zuerst bei konstanter Temperatur die Druckgeschwindigkeit iteriert, um ein Optimum zu bestimmen. Wenn dann mit dieser optimalen Geschwindigkeit die Temperatur variiert wird, um für diesen Faktor auch das beste Ergebnis zu erzielen, erhält man zwar eine Parameterkombination, die aber auch nicht optimal sein kann. Bei miteinander gekoppelten Faktoren kann zwar eine langsame Geschwindigkeit bei geringen Temperaturen vorteilhaft sein, jedoch ist bei heißeren Temperaturen auch eine höhere Druckgeschwindigkeit gefragt. Die strategische Versuchsplanung zeigt übersichtlich, in welchen Parameterbereichen ein guter Druck möglich ist und kann auch bei mehreren maximalen Punkten das Optimum bestimmen. Die Analyse ist nicht nur auf zwei Parameter beschränkt, sondern kann beliebig viele Faktoren und Antwortkriterien erfassen.

Problematisch wird dann jedoch, dass bei vielen Einflüssen auch die Anzahl der Versuche exponentiell steigt. Die Menge an Experimenten lässt sich berechnen durch die Anzahl an Stufen pro Faktor hoch der Anzahl der betrachteten Faktoren. Bei drei Parametern, die jeweils drei verschiedene Stufen annehmen sollen, müssen schon 27 Experimente gemacht werden. In Rahmen dieser Arbeit sollten mindestens folgende Faktoren beachtet werden: Extrudertemperatur während der Arcs, Extrudertemperatur in den Schichten nach dem Arc-Layer, Druckgeschwindigkeit im Arc-Layer,

Druckgeschwindigkeit für das Infill in den Schichten über dem Layer, Druckgeschwindigkeit für die Kontur in den Schichten über dem Layer, Infill-Muster und -Dichte in den Schichten über dem Arc-Layer, maximaler Radius der Arcs, Kühlung im Arc-Layer und in den Schichten danach, und die Extrusionsdicke im Arc-Layer. Diese Parameter sollten für ein aufschlussreiches Ergebnis mindestens drei Stufen haben, wobei das bei der Bestimmung von Geschwindigkeiten oder Infill-Dichten auch zu grob sein kann. Allein durch diese 11 Faktoren mit den drei Stufen wären $3^{11} = 177.147$ Versuche nötig, wobei jeder auf alle genannten Qualitätskriterien untersucht werden müssten. Das ist innerhalb dieser Arbeit eindeutig nicht möglich. Deshalb wurde die klassische Parameterstudie gewählt, bei der mit typischen Startparametern angefangen wird und die entstehenden Probleme kritisch untersucht werden. Durch ausgiebiges Wissen und überlegte Anpassungen können dann neue Experimente mit einer Prognose angestellt werden. So kann iterativ ein guter Parametersatz ermittelt werden und gleichzeitig unverhältnismäßig viele Versuche vermieden werden.

3.6 Alternative Methoden und Experimente

Während der Arbeit kamen häufig Ideen auf, die eine potenzielle Lösung oder Verbesserung für ein Problem darstellen könnten, aber aus verschiedenen Gründen nicht umgesetzt wurden. Das bedeutet nicht, dass diese Ideen schlechter sind oder nicht umgesetzt werden sollten. Für weitere Forschung an diesem Thema können die Ansätze durchaus nützlich und sinnvoll sein. Da diese Methoden noch nicht ausprobiert wurden, ist manchmal die Auswirkung oder die Veränderung, die dann im Druckteil entsteht, nur abschätzbar.

Eine Idee, die sich relativ früh bildete und noch lang hilfreich erschien, ist die adaptive Infill-Dichte. Direkt oberhalb der dünnen Schicht bestehend aus Arcs sind die Auswirkungen von Warping und Materialaufschmelzung noch am folgeschwersten. Das kann vermieden werden durch allgemein weniger Material, das gedruckt wird. Der Nachteil mit dem geringen Infill ist die dementsprechend geringere Stabilität im Bauteil. Die kann jedoch in den höheren Ebenen weiter über den Arcs hergestellt werden, wenn der Überhang nicht mehr so fragil ist. Hier kann ohne entstehende Probleme die Infill-Dichte erhöht werden. Mit dem Gedanken wäre eine stetige Steigerung der Dichte mit einem geringen Wert als Startpunkt die entsprechende Umsetzung.

Der Grund dafür, dass diese Methode nicht umgesetzt wurde, ist die Schwierigkeit der Implementierung in ein Python Skript. Die Bahnplanung wird hauptsächlich vom Slicer gemacht. Dieser erstellt mit der gewählten Infill-Dichte das Muster, das dann gedruckt wird. Ein Python-Programm kann gegebenenfalls G-Code-Abschnitte kopieren, löschen und an anderen Stellen einfügen, ist aber ohne Weiteres nicht in der Lage, neue Bewegungsabläufe anhand einer gegebenen Geometrie zu erstellen. Eine Herangehensweise wäre das Programmieren einer Funktion, die genau das kann, was jedoch sehr anspruchsvoll ist. Eine andere Überlegung, die eventuell besser umzusetzen ist, ist das mehrfache Slicen des 3D-Modells in verschiedenen Infill-Dichten. Dann kann ein selbstgeschriebenes Programm die verschiedenen G-Code-

Abschnitte der Dateien zu einer Datei zusammenfügen, um die stetig steigende Dichte zu realisieren.

Eine überschaubarere Methode, die es lohnt auszuprobieren, könnte die Hilbert Kurve als Infill-Muster nur auf den äußeren Teilen des Überhangs drucken. Wenn diese Art Infill nicht im Bereich der Abknickkante gedruckt wird, besteht keine Gefahr, dass dieser sich zu sehr erwärmt. In diesem Bereich ist dann ein anderes Infill nötig, das nicht dazu neigt, viel Wärme an die ersten paar Arcs abzugeben. Ein Muster, das aus kurzen Linien besteht, die vom Bauteil weg verlaufen wäre ein Beispiel dafür.

Ein Infill-Muster, das innerhalb der gleichen Ebene abhängig von der Bauteilgeometrie wechselt, ist jedoch ebenfalls relativ anspruchsvoll. Das ist auch der Grund, warum diese Idee nicht weiter verfolgt wurde.

Es wurde auch über eine komplett neue Art des Infills nachgedacht, die zugeschnitten auf Arc Overhangs in Kombination mit der Überhangsgeometrie ist. Die daraus folgende Idee ist eine Art Zick-Zack-Linie, die Ähnlichkeiten zum Dreiecks-Muster aufweist, jedoch weniger Querverbindungen beinhaltet. Abbildung 53 soll das verdeutlichen.

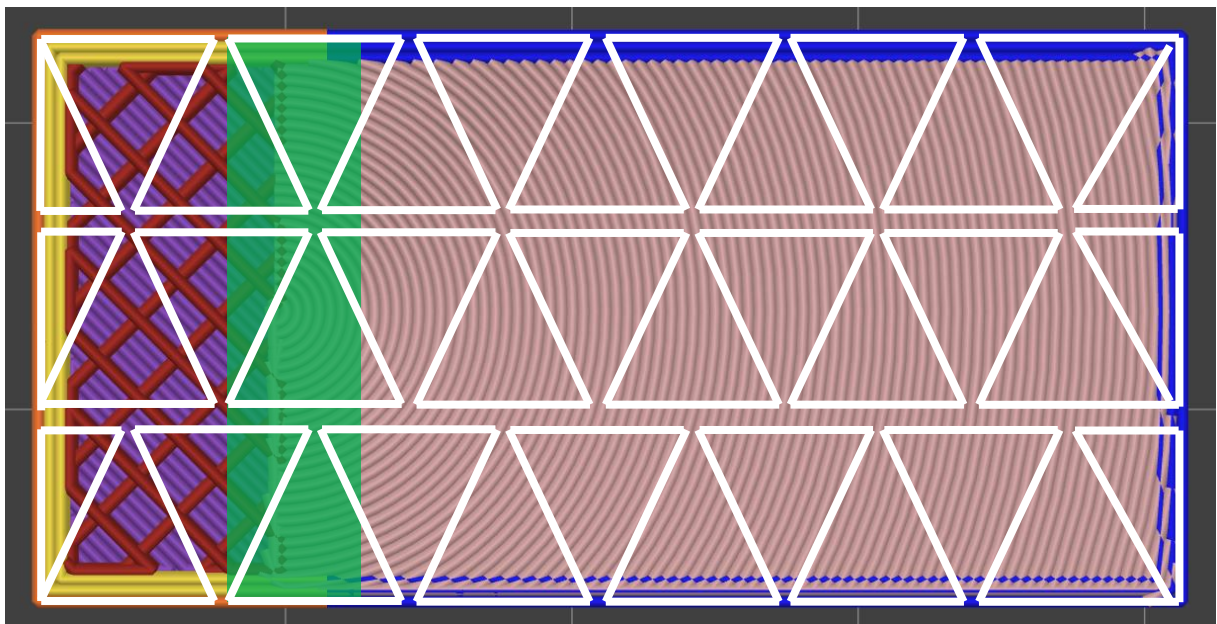


Abbildung 53: Neue Form von Infill-Muster

In Abbildung 53 ist das beschriebene Infill-Muster weiß eingefärbt. Das Ziel ist die Vermeidung von Warping und von Materialaufschmelzung. Wenn das Infill langsam und nicht zu heiß gedruckt wird, könnte erreicht werden, dass durch die vielen schrägen Elemente die Wölbung in Längsrichtung (im Bild waagrecht) minimiert wird. Außerdem sind die gedruckten Linien größtenteils zusammenhängend, und mit weniger Druckunterbrechungen hat das Material eine bessere Haftung zur Ebene darunter. Zudem werden mit diesem Infill-Muster keine Konturen außen benötigt. Somit fällt eine weitere Hauptursache für Warping-Probleme weg. Die Qualität der Oberfläche an den Seiten könnte jedoch fragwürdig sein und muss in Testdrucken analysiert werden. Durch die Materialdichte ist eine ausreichende Stabilität gegeben, während nicht zu viel Material auf einer Stelle gedruckt wird, was die Schicht darunter

aufschmilzt. Eine weitere Maßnahme, die verhindern soll, dass der Überhang absackt, ist die Unterteilung der Kurve in die drei waagerechten Segmente. Dies soll bewirken, dass nicht die komplette Breite der Abknickkante (in der Abbildung als grüner Bereich gekennzeichnet) erwärmt werden kann. In der Zeit, in der ein Drittel des Infills zu Ende gedruckt wird, bleibt genug Zeit, damit das Material im kritischen grünen Bereich abkühlen kann.

Dieses Muster könnte besonders bei der Anwendung von Arc Overhangs oder anderen fragilen Strukturen nützlich sein, und den Toleranzbereich der anderen Parameter vergrößern. Die Umsetzung eines neuen Druckmusters beinhaltet wiederum auch die Generierung von G-Code für eine neue Bahnplanung, was ein komplexes Python-Programm erfordert. Es ist jedoch definitiv empfehlenswert, diese Überlegung in zukünftige Forschungen einzubinden.

Wenn die Idee der Druckpausen an verschiedenen Stellen weiterhin aufgegriffen wird und sich als nötig erweist, ist auch eine Methode notwendig, die identifizieren kann, in welchem Bereich das Bauteil gedruckt wird. Damit kann der Bereich, in dem die Pause stattfindet und die Wiping-Line gezogen wird so angepasst werden, dass dieser sich nicht mit dem Bauteil überschneidet. Diese Methode war jedoch innerhalb dieser Experimentreihe nicht notwendig, da nur der eine Prüfkörper immer an der gleichen Stelle gedruckt wurde. Deswegen ist sie auch nicht im Code implementiert worden.

Das hybride Arbeiten mit Arc Overhangs in Kombination mit nur wenigen stützenden Supportstrukturen ist eine Idee, die schon von Nicolai Wachenschwan angedeutet wurde und eine sinnvolle Lösung für das Drucken von großen und dünnen Überhängen darstellt. Hierfür eignen sich Baum-Supports besonders gut, da diese nicht den kompletten Überhang stützen, sondern punktuell an ausgewählten Stellen ansetzen. Das hat den wesentlichen Vorteil, dass Material und Druckzeit eingespart wird, weil der Support nicht das komplette Volumen unter dem Überhang ausfüllt. In der Abbildung 54 ist ein Vergleich zwischen den beiden Supportstrukturen zu sehen.

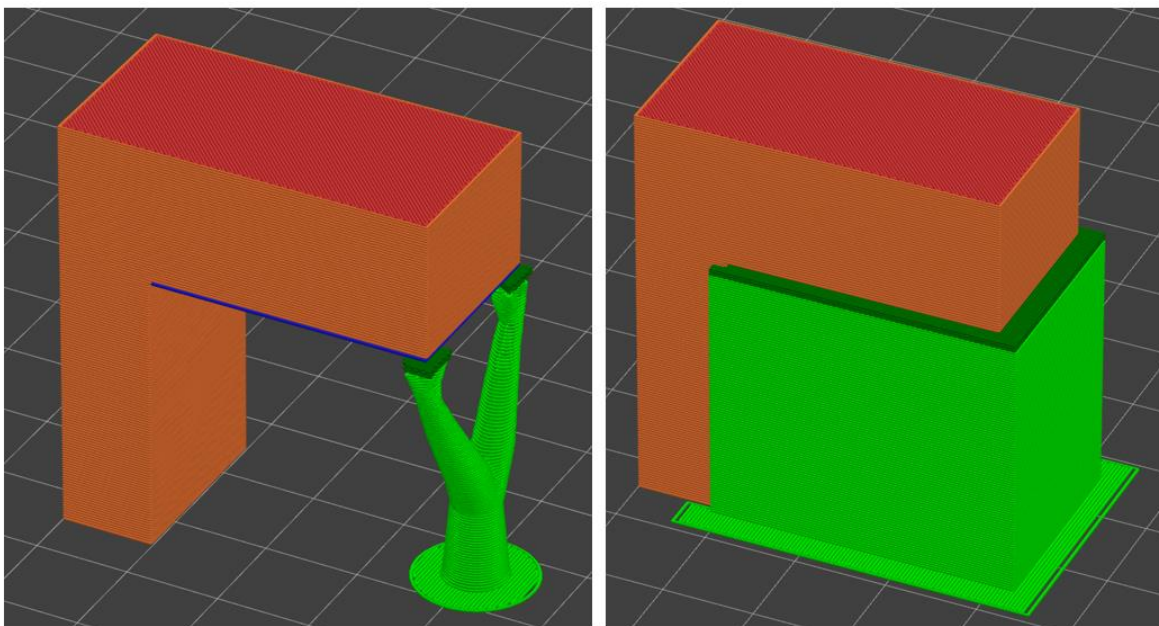


Abbildung 54: Vergleich von Tree-Supports (links) und normalem Support (rechts)

Eindeutig ist erkennbar, dass die Tree-Supports materialsparender sind. Zusätzlich zeigen sie eine geringere Kontaktfläche mit dem Bauteil, was nach der Entfernung des Supports eine bessere Oberfläche bietet. Bei komplexeren Bauteilen kann sich unter anderem auch das Entfernen schwierig gestalten und es ist hilfreich, dünnere Stützstrukturen zu drucken. Die Vorteile, die sich durch die wenigen Stützen in der Stabilität bemerkbar machen, sind jedoch beachtlich, da der Überhang sonst wegen des großen Hebels viele Kräfte aufnehmen muss. Diese Belastungen wären deutlich geringer in einer Anwendung, wo der Überhang auf mehreren Seiten gestützt ist, wie bei einer Brücke. Wenn das Material nun an einer Stelle leicht aufgeschmolzen wird, kann nicht der komplette Überhang heruntersacken, da er auf zwei oder mehreren Punkten aufliegt. Höchstens ein Durchhängen in der Mitte zwischen diesen Stützpunkten ist möglich, was aber deutlich größere Kräfte erfordert. Ebenfalls könnte Warping verhindert oder eingeschränkt werden, weil an der Stelle, wo sich das Bauteil nach oben wölben würde, Stützen angebracht sind. Diese Supports sind geringfügig mit dem Bauteil verbunden und ein kleiner Abstand dazwischen sorgt dafür, dass das Entfernen später leichter fällt. Dennoch kann die Stütze geringe Kräfte in positive Z-Richtung aufnehmen und damit teilweise auch Warping kompensieren. Es entsteht eine Mischung der Vorteile von Arc Overhangs und der Stützen, die sich als äußerst effektiv darstellen kann.

Erste Tests können mit relativ wenig Aufwand gedruckt werden, jedoch muss für eine finale Implementierung ein Entscheidungsprozess bestimmen, wann, wo und wie viel Supportmaterial gedruckt werden soll. Aktuell bietet Prusa die Möglichkeit an, entweder manuell zu bestimmen, wo sich die Stützen befinden sollen oder auf die automatische Erstellung zurückzugreifen. Dabei werden relativ viele Stützen gleichmäßig auf dem ganzen Überhang verteilt und nicht nur an besonders fragile Punkte gesetzt.

Eine Überlegung über die Anpassung der Arcs im Extremfall ist die Nutzung von komplett geraden Linien anstatt der typischen konzentrischen Kreisbögen. So konnte einheitlicher gedruckt werden, ohne dass sich die Eigenschaften der Arcs mit dem Größerwerden verändern. Weiterhin haften die Linien seitlich aneinander und stabilisieren sich somit selbst ohne erforderliche Supportstrukturen. Ein zusätzlicher Vorteil davon ist die höhere Genauigkeit und bessere Oberflächenqualität in rechtwinkligen Ecken. Diese kommen in den meisten Anwendungen häufiger vor als Rundungen, die genau den gleichen Radius haben, wie die Arcs an der Stelle (siehe Abbildung 49).

Ein dadurch entstehender erheblicher Nachteil ist jedoch die entsprechende Instabilität, die eine solche Veränderung mit sich bringt. Arcs haben bezogen auf die Stabilität zwei erhebliche Vorteile: Einerseits haben Kreisbögen Komponenten in zwei unterschiedliche Richtungen. Die X- und Y-Richtung. Somit sind die Arcs widerstandsfähiger gegen Belastungsmomente, die in diese beiden Richtungen auftauchen. Wenn nur mit geraden Linien gedruckt wird, die beispielsweise in X-Richtung verlaufen, können nur sehr geringe Momente aufgenommen werden, die genau diese X-Achse als Drehpunkt haben. Diese Momente entstehen jedoch genau bei einer Belastung in Z-Richtung nach unten, z.B. durch die Schwerkraft. Auch ist durch die konvexe Form der Arcs auch eine bessere seitliche Haftung gegeben. Nicht

nur durch die vergrößerte Oberfläche, sondern zusätzlich dadurch, dass sich ein äußerer Kreisbogen beim Abkühlen und Zusammenziehen praktisch noch an den inneren Arc anpresst und dadurch eine noch stabilere Verbindung entsteht. Dies ist auch der Grund, warum Arcs mit sehr großem Radius und verhältnismäßig kleinem Winkel vermieden werden sollen.

Neben zusätzlichen Methoden können auch unabhängig davon andere Ideen ausprobiert werden. Eine davon ist die Reduktion der Drucktemperatur während der Arc Overhangs auf 195 °C. Dann hat der Kunststoff eine höhere Viskosität und kann nicht nur schneller abkühlen, sondern ist auch widerstandsfähiger gegen die Eigengewichtskräfte, die das Filament nach unten ziehen. Weiterhin kann die Temperatur mit jeder Schicht etwas weiter erhöht werden, da der Überhang fortlaufend immer weniger anfällig für Verformungen durch Wärme ist. Die höhere Temperatur hilft bei einer langsameren und gleichmäßigen Abkühlung, die in den höheren Schichten erforderlich ist. So können weitere Versuche angestellt werden, in denen die maximale und minimale Grenze des Temperaturbereiches ausprobiert werden.

Ebenfalls kann in Kombination zur reduzierten Drucktemperatur die Druckdicke erhöht werden für die Arc Overhangs. Dies kann entweder durch eine Düse mit größerem Durchmesser geschehen oder durch Parameteranpassungen im Slicer. Eine Veränderung der Düsengröße muss im Slicer angegeben werden, damit entsprechend mehr Filament pro Strecke extrudiert werden kann. Auch ohne Veränderung des Extruders kann die Schichthöhe und die Linienbreite im Slicing-Programm geändert werden, was in einer dick gedruckten Linie resultiert. Mit dieser Anpassung hätten die Arcs eine größere seitliche Kontaktfläche und somit auch eine bessere und stabilere Verbindung miteinander. Eine stärkere Schicht Arc Overhangs erleichtert den Druck der darauffolgenden Schichten und vergrößert den Toleranzbereich der restlichen Parameter.

Eine Maßnahme, die sehr viel Erkenntnis über alle anderen Anpassungen mit sich bringen kann, ist die Drucküberwachung mit einer Wärmebildkamera. Da viele auftretende Probleme auf einen fehlerhaften Temperaturverlauf zurückzuführen sind, kann dieser in verschiedenen Bereichen des Druckobjektes aufgezeichnet werden. Mit einer solchen Messung ist besser zu bestimmen, wie sich das Material in unterschiedlichen Situationen verhält. Die aktuellen Temperaturwerte des Bauteils beziehen sich auf die Extrudertemperatur beim Extrudieren und auf die prozentuale Kühlleistung, die erbracht wird. Mit diesen Werten kann die Temperatur an bestimmten Punkten des Teils jedoch nur geschätzt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass Material nicht nur in einer unbestimmten Geschwindigkeit abkühlt, sondern auch aufgewärmt werden kann durch das Drucken von Material direkt daneben. So ist schwer bestimmbar, wie genau sich die Temperatur im Zeitverlauf verhält und welche Effekte dadurch begründet werden können.

Eine Wärmebildkamera ist eine sehr fortgeschrittene Kamera, welche die Temperatur einer Oberfläche mittels der Infrarotabstrahlung messen kann. Solche Kameras sind relativ teuer und müssen für die beschriebene Anwendung eine gewisse Qualität aufweisen. Es erweist sich dennoch als sinnvoll, für eine ausführlichere Testreihe solche Messungen anzustellen.

Ein ebenfalls wichtiges Experiment soll den Zusammenhang zwischen Infill-Muster und der Entstehung von Warping untersuchen. Es gibt zwar eine theoretische Erklärung für die innere Spannungsverringerng durch die Nutzung der Hilbert Kurve als Infill, aber für die Anwendung im 3D-Druck mit PLA und einem FDM-Drucker gibt es noch keine offizielle Studie. Wenige Experimente würden hierbei schon reichen, um einen Vergleich zwischen verschiedenen Infill-Mustern herzustellen. Dafür könnte ein neues Druckobjekt erstellt werden, das eine möglichst große Fläche in einer Ebene hat und nur wenige Schichten hoch ist. Für eine bessere Differenzierung kann auch die Konturlinie weggelassen werden, während die Schicht mit viel Kühlung und geringer Druckbetttemperatur gedruckt wird. Somit werden die Ursachen für Warping explizit hervorgerufen und in der Auswertung ist zu messen, bei welchem Infill die Wölbung am wenigsten stark auftritt. Auch die Ideen der neuen Infill-Muster könnten bei der Gelegenheit für einen Vergleich benutzt werden.

Die letzte und auch schwierigste Idee ist die Programmierung eines neuen Slicers. Viele Überlegungen, die für einen 3D-Drucker durchaus möglich sind, werden beschränkt durch die Funktionen des Slicers. Die Grundlage von Slicing-Programmen ist das „Schneiden“ der 3D-Modelle in einzelne Schichten, die dann gedruckt werden können. Daher auch der Name Slicer (auf Deutsch: Schneider). Wenn jedoch dieses Konzept neu überdacht wird, können auch Druckbewegungen unabhängig von diesen Ebenen gemacht werden. Spezielle Drucker, wie der „RotBot“ der ZHAW nutzen bereits konische Ebenen aufgrund der zusätzlichen Drehachse des Extruders. Aber auch nicht-modifizierte Drucker können bis zu einem gewissen Grad unabhängig von waagerechten Ebenen drucken. Dieser Grad ist gegeben durch die Bauart des Extruders und dessen Bewegungsfreiheit. Die wenigsten 3D-Drucker sind für eine non-planare Slicing-Software ausgelegt und können deswegen nur sehr eingeschränkt gleichzeitige Bewegungen in X-, Y- und Z-Richtung machen, ohne mit dem gedruckten Bauteil zu kollidieren. Eine geringe Veränderung des Extruders ist in Abbildung 55 zu sehen, wobei der Druckkopf einen erheblich größeren Winkel-Spielraum aufweist. Je nach Bauart können verschieden große Winkel in einer nicht-planaren Ebene gedruckt werden.

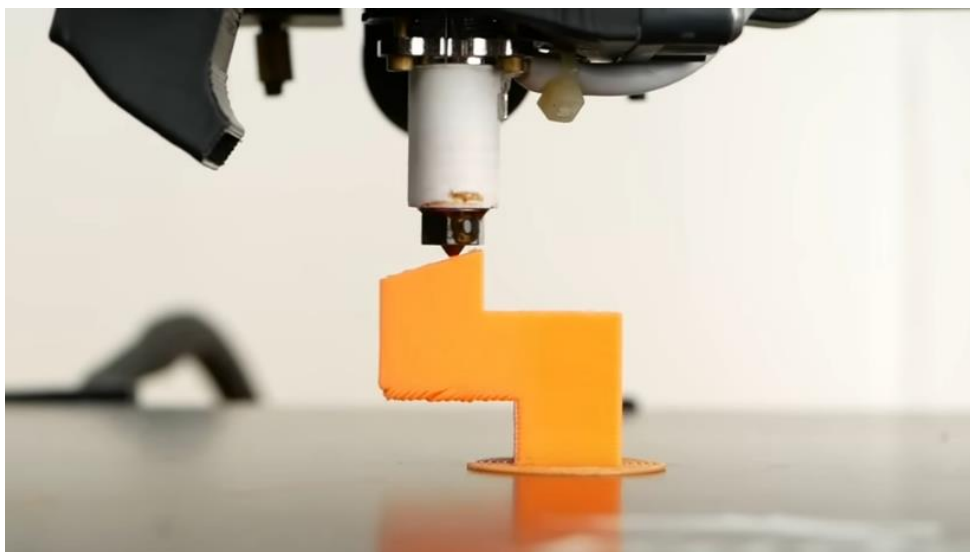


Abbildung 55: Druckkopf mit dünnerem Extruder für nicht-planare Druckschichten [5]

Es gibt schon einige wenige Ansätze, die sich mit dieser Slicing-Art beschäftigen, jedoch wurde dies noch nicht in einem Slicer implementiert. Das Konzept bringt eine komplette Reihe an neuen Problemen mit sich genauso wie viele Einschränkungen. Dennoch bietet es die Möglichkeit, einen waagerechten Überhang nicht nur in einer Ebene zu drucken, sondern diesen auf mehrere, schräge Ebenen aufzuteilen, wie auch die Abbildung 55 zeigt. Somit werden aus einem großen und zusammenhängenden Überhang mehrere kleinere Überhänge, die auch mithilfe von Arcs gedruckt werden können. Das erzeugt einen stabileren Überhang und eine bessere Schichthaftung zwischen den Layern. Auch ein Überhang von mehr als 90° wäre damit in der Theorie möglich, müsste aber noch sehr angepasst werden, um eine gute Druckqualität zu gewährleisten.

Eine andere Anwendung eines neuen Slicers ist das Wechseln zwischen Schichten. Wenn von normalen waagerechten Schichten ausgegangen wird, kann ein neuer Slicer beispielsweise eine Schicht in der Mitte abbrechen, bevor diese zu instabil wird und die Schicht darüber kann weitergedruckt werden. Wenn die beiden Schichten eine stabilere Einheit bilden, kann die obere Schicht pausiert werden und die untere Ebene wird zu Ende gedruckt. Mit diesem Schema wären weitere Möglichkeiten umsetzbar und könnten beispielsweise für verhältnismäßig sehr lange Überhänge genutzt werden, die sich unter ihrem eignen Gewicht verformen würden. Zusätzlich ist eine entscheidungstreffende Instanz im Programm nötig, die erkennen kann, wann genau ein Überhang zu instabil wird und aus der Schicht darüber gestützt werden muss. Dafür müssten Versuchsdaten mit verschiedenen Geometrien und Umständen erstellt werden, die für diese Entscheidung als Grundlage dienen kann.

Wie schon angedeutet ist dies eine sehr umfangreiche Idee, die eine recht komplexe Umsetzung erfordert. Aufgrund der zeitlichen Beschränkung dieser Arbeit ist die Erstellung einer neuen Slicing-Software, oder eines Programmes, das den G-Code dementsprechend umschreiben kann, nicht möglich. Für zukünftige Forschungen ist dieses Konzept jedoch durchaus zu beachten und gegebenenfalls zu nutzen.

3.7 Alternative Designregeln

Die Designregeln des normalen Drucks sind relativ umfangreich. Für die Nutzung der Arc Overhangs verändern sich diese insofern, als im Wesentlichen deutlich steilere Überhänge ohne Stützmaterial gedruckt werden können. Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, funktioniert diese Technik zwar, aber nicht ohne Probleme. So müssen die Designregeln in dieser Hinsicht näher definiert werden, um so eine Balance zwischen Druck- bzw. Materialaufwand und der Bauteilqualität herzustellen.

Waagerechte Überhänge sind schwerer zu drucken, je größer die überhängende Fläche ist. Wenn nun jedoch der Überhang nicht waagerecht ist, sondern eine ganz flache Steigung von 10° zur Waagerechten hat, muss der Überhang nicht komplett in einer Ebene gedruckt werden. Der Überhang wird abhängig von der Schichtdicke und der Geometrie des Überhangs auf verschiedene Ebenen verteilt. Dies bringt einige Vorteile mit sich und kann die Druckqualität des Bauteils stark verbessern. Wie auch bei normalen Überhängen, die nicht mit Arcs gedruckt werden, können bessere Ergebnisse mit einer geringeren Schichtdicke erzielt werden. Mit einer Halbierung der

Schichtdicke, werden zwar doppelt so viele Layer gedruckt, aber pro Layer ist der Überhang auch nur halb so groß. Da kleinere Überhangsflächen weniger wirkenden Kräften ausgesetzt sind, werden auch Verformungen und Artefakte in geringerem Maße auftauchen.

Welcher Winkel als Guideline gesehen werden kann, ist nicht direkt trivial. Für die optimale Winkelgrenze eines qualitativ hochwertig gedruckten Überhanges muss eine weiterführende Studie angestellt werden. Diese beschäftigt sich mit den Qualitätsveränderungen bei verschiedenen Schichtdicken und Steigungswinkeln.

Diese beiden Parameter müssen in Kombination variiert werden, um einen optimalen Überhangswinkel unter 90° zu wählen, der auch im größeren Maßstab keine Probleme verursacht und trotzdem so nah wie möglich am waagerechten Überhang dran ist. Zu vermuten ist, dass ein sehr dünner und flacher Überhang die meisten Probleme verursacht, da die dünne Schichtdicke besonders anfällig für Verformungen und Aufschmelzungen ist. Wenn der Winkel bei gleichbleibender Layer-Höhe steiler wird, besteht das Potenzial, eine gute Qualität zu erreichen. Nicht nur ist die überhängende Fläche in jeder Schicht hinreichend klein, sondern durch die feineren Schichten sind diese auch weniger stark im finalen Druckobjekt zu erkennen. Wohingegen dicke Schichten einen Neigungswinkel von bis zu 90° ermöglichen, da die einzelnen Arcs die nötige Stabilität aufweisen, um auch bei großen Überhängen die Form beizubehalten. Der Nachteil dabei ist aber der ästhetische Eindruck, da die einzelnen Stufen der verschiedenen Ebenen bei einer größeren Schichthöhe deutlicher zu sehen sind. Das lässt wiederum nach mit einer Steigerung des Winkels. Dadurch werden nicht nur die einzelnen Stufen immer unauffälliger, sondern auch die Stabilität und die Formtreue erhöht sich.

Ebenfalls ist noch eine Untersuchung nötig, die aufzeigt, welche Überhangswinkel überhaupt mit Arc Overhangs zu drucken sind. In vielen Design-Richtlinien heißt es zwar, dass Überhänge von über 45° vermieden werden sollen, jedoch impliziert das nicht, dass alle extremeren Überhänge mit Arcs gedruckt werden können. Wenn ein 45° Überhang mit einer geringen Schichtdicke von 0,2 mm nach dieser Methode gedruckt werden soll, wäre die Überhangslänge pro Schicht ebenfalls nur 0,2 mm lang. Diese Überhangsfläche mit Arcs zu füllen, erscheint nicht sinnvoll, da die Struktur der aufeinander aufbauenden Bögen gar nicht auf eine solche schmale Fläche gedruckt werden kann. Wenn beispielsweise gesagt wird, dass eine Mindestanzahl von 10 Arcs erreicht werden soll, dann liegt der minimale Überhangswinkel der Arcs bereits bei ca. 80° . Für alle Winkel zwischen 45° und 80° sollte mindestens eine Verschiebung des Mittelpunktes in das Bauteil stattfinden, damit der erste Arc nicht so klein ist.

Da die beschriebene Studie nicht Inhalt dieser Arbeit ist, kann mit diesen Vermutungen nur eine geschätzte Winkelgrenze beschrieben werden, die fortlaufend jedoch nicht als gültig betrachtet werden kann. Die gemachten Experimente lassen in etwa darauf schließen, dass ein Überhang von 5-10 Millimetern noch keine Probleme oder Instabilitäten aufzeigt. Mit einer durchschnittlichen Schichtdicke von 0,3 Millimetern wäre somit ein Überhang von 85° schon ohne Probleme druckbar. In einigen Anwendungsfällen, wo die exakte Geometrie nicht so ausschlaggebend ist, kann diese Möglichkeit gut genutzt werden, um eine gewisse Oberflächenqualität zu bewahren.

3.8 Modell zur Amortisationsberechnung von Arc Overhangs

Um Arc Overhangs gebräuchlicher zu machen und die Vorteile besser zu veranschaulichen, kann ein Entscheidungstool behilflich sein, das die gegebenen Umstände einbezieht. Mit diesen Daten kann dann eine Empfehlung gegeben werden, ob ein Bauteil mit Arc Overhangs gedruckt werden sollte oder nicht. Es stellt sich heraus, dass die Antwort auf diese Frage recht komplex ist. Es gibt für die Nutzung der Arc Overhangs Vorteile sowie Nachteile, die in verschiedenen Anwendungsfällen eine unterschiedliche Gewichtung tragen. Folgend wird ein Modell vorgestellt, das aufzeigen soll, in welchen Fällen die Nutzung von Arc Overhangs besser ist als die Nutzung von Stützmaterial.

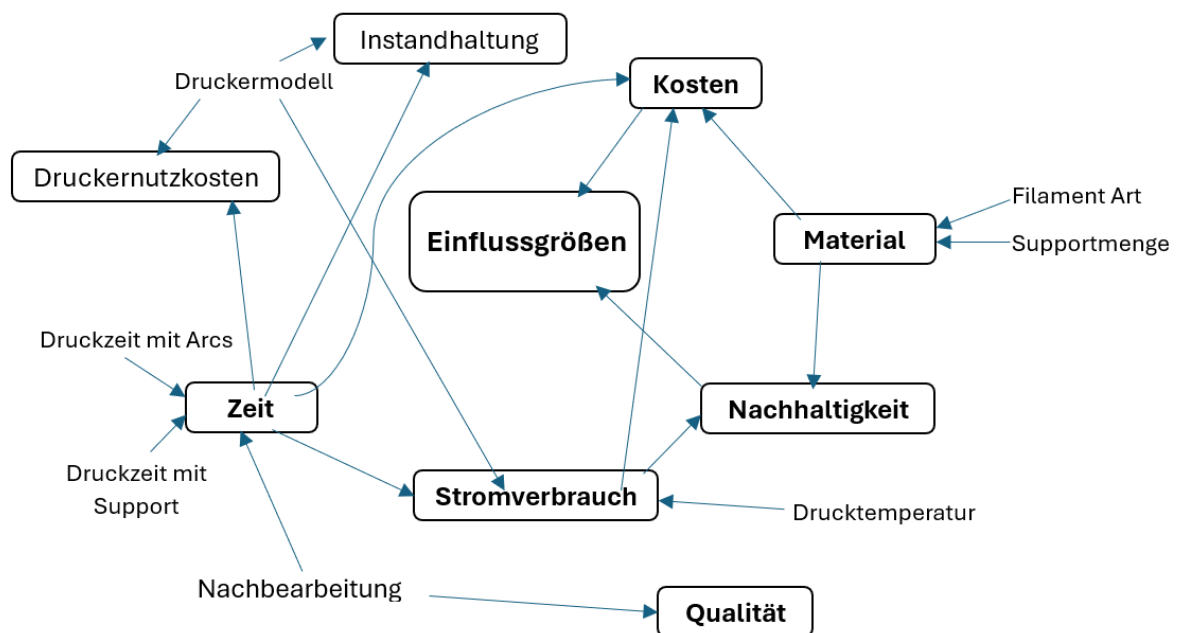


Abbildung 56: Einflüsse für Entscheidungsmodell

Die Abbildung 56 zeigt eine Zusammenhangsübersicht der einzelnen Kriterien, die analysiert werden. Die Pfeile symbolisieren dabei, welcher Faktor auf andere einen Einfluss hat. Die Pfeilspitze zeigt jeweils auf das Element, das beeinflusst wird und die dick gedruckten Einflüsse indizieren eine hohe Wichtigkeit für den Druck. Anhand dieses Modells lassen sich Rechnungen aufstellen, die größtenteils behandeln, welche Kosten bei jedem Druck entstehen können. Das ist besonders in der Industrie ein ausschlaggebender Faktor, für den Vergleich verschiedener Methoden. Andere Faktoren, wie Formtreue, Stabilität, Qualität und Nachhaltigkeit sind zwar ebenfalls sehr entscheidend und wichtig, werden aber im folgenden Teil ausgelassen, da beispielsweise die Qualität der Herangehensweisen sich je nach Druckparameter verändert und ähnlich wie die Nachhaltigkeit schwer zu messen bzw. zu gewichten ist. So bestimmten folgende Rechnungen größtenteils die Kosten eines 3D-Drucks:

$$\begin{aligned}
\text{Kosten gesamt} &= \text{Materialkosten} \\
&+ \text{Stromkosten} \\
&+ \text{Abschreibungskosten} \\
&+ \text{Instandhaltungskosten}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Diese einzelnen Kostenfaktoren aus Gleichung 3.1 sind nun noch zu definieren. Beginnend bei den Materialkosten sind nur die Materialmengen der Drucke und der Preis des Filaments herauszufinden. Dies geht relativ schnell, da jedes Slicing-Programm auch das Gewicht des genutzten Filaments anzeigt und der Preis beim Kauf des Filaments bekannt ist. So ergibt sich die Rechnung 3.2:

$$\text{Materialkosten} = \text{genutztes Material in kg} \cdot \frac{\text{Materialkosten}}{\text{kg}} \tag{3.2}$$

Die Stromkosten sind nicht so allgemein genau bestimmbar, da Drucker zwar mit einer Leistungsangabe in Watt gekennzeichnet sind, diese aber nur die maximale Leistung beschreibt. Ein 450 W Drucker verbraucht so viel Leistung nur beim Aufheizen vor dem Druck. Dabei wird viel Energie genutzt, um den Extruder und die Druckplatte schnellstmöglich auf die gewünschte Temperatur zu bringen. Gleichzeitig laufen die Lüfter auf höchster Stufe und es können auch die Stepper-Motoren für die Homing-Sequenz genutzt werden. Im normalen Druck werden dann nur noch kleine Temperaturanpassungen vorgenommen und der Druckkopf wird bewegt. Die tatsächliche Leistung kann am Netzteil des Druckers gemessen werden und liegt variierend meist bei 20-50 % des angegebenen Werts. Das hängt auch von der jeweiligen Drucktemperatur ab und von den Geschwindigkeiten, mit denen sich der Druckkopf bewegt. Für die folgenden Rechnungen wird ein geschätzter Mittelwert bestimmt. Diese Leistung wird dann über die gesamte Druckzeit erbracht und mit der Multiplikation der beiden Werte erhält man die Energie, die für den Druck nötig ist. Die Energie muss noch mit dem geltenden Strompreis multipliziert werden, was dann die Stromkosten ergibt. Die Rechnung 3.3 zeigt das:

$$\text{Stromkosten} = \text{Durchschnittsleistung} \cdot \text{Druckzeit} \cdot \text{Strompreis} \tag{3.3}$$

Die Abschreibungskosten beziehen sich auf den Einkaufspreis des Druckers. Besonders Industrie-Drucker können mehrere zehntauschende Euro kosten, was in den Kosten beachtet werden muss. Um diese Kosten auf jeden Druck aufzuteilen, kann der Einkaufspreis durch die geschätzte Lebenserwartung dividiert werden. So erhält man eine Aufteilung des Einkaufspreises auf jede Stunde Druckzeit. Für die Abschreibungskosten pro Druck müssen die stündlichen Kosten mit der Druckzeit multipliziert werden, wie Gleichung 3.4 zeigt.

$$\text{Abschreibungskosten} = \frac{\text{Einkaufspreis}}{\text{Lebenserwartung in Stunden}} \cdot \text{Druckzeit} \tag{3.4}$$

Zuletzt treten die Instandhaltungskosten ebenfalls nicht bei jedem Druck auf, sind aber trotzdem nicht zu vernachlässigen. Bei Hobbydruckern halten sich die Kosten meist in Grenzen, da bei eigenen Reparaturen nur die Ersatzteile Geld kosten und die Reparatur im Wesentlichen Zeit kostet. Bei Industriedruckern müssen Reparaturen durch Fachkräfte durchgeführt werden, sodass preislich ein deutlich größerer Unterschied entsteht. Der Reparaturaufwand eines Druckers ist bis auf einige Verschleißteile nicht

gut abschätzbar, deswegen ist es eine Faustregel, mit 10 % der Abschreibungskosten zu rechnen. Das stellt die Gleichung 3.5 auf:

$$\text{Instandhaltungskosten} = 0,1 \cdot \text{Abschreibungskosten} \quad (3.5)$$

Mit diesen Gleichungen können nun verschiedene Beispiele analysiert werden, um den finanziellen Nutzen von Arc Overhangs einzuschätzen.

3.8.1 Beispiel 1 – Hobbydruck des Prüfkörpers

In Beispiel 1 wird ein nicht-industrieller Druck betrachtet, bei dem das Prüfobjekt aus dem experimentellen Teil gedruckt wird. Einmal werden Supportstrukturen zur Unterstützung hinzugefügt und einmal wird der Überhang mit Arc Overhangs gedruckt. Es wird der gleiche Drucker genutzt und es herrschen die gegebenen Umstände, die auch für die Testdrucke zutreffen. Ein Vergleich am Ende soll zeigen, welche Methode kosteneffizienter ist.

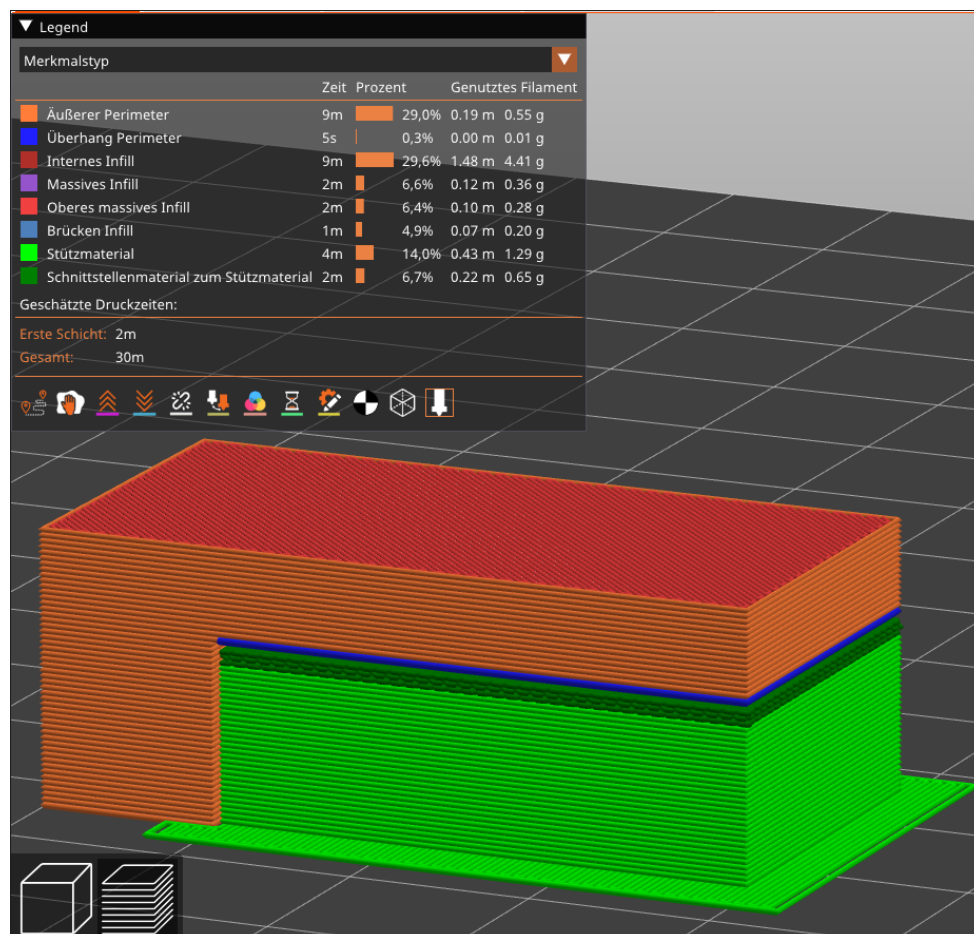


Abbildung 57: Beispieldruck 1 mit Supportmaterial

Abbildung 57 zeigt das Bauteil in der Slicing-Software mit den generierten Supportstrukturen. Weiterhin zeigt das Programm Informationen über die gedruckte Materialmenge und die benötigte Druckzeit.

Das genutzte Filament ist PLA mit einem Preis von 25 € pro Kilogramm. Insgesamt werden 7,77 Gramm Filament benötigt, davon machen 1,94 Gramm das Stützmaterial aus. Damit errechnen sich in Gleichung 3.6 die Materialkosten folgendermaßen:

$$\text{Materialkosten} = 0,00777 \text{ kg} \cdot \frac{25 \text{ €}}{\text{kg}} = 0,194 \text{ €} \quad (3.6)$$

Die Druckzeit beträgt 30 Minuten. Die Stromkosten beim genutzten Stromanbieter belaufen sich auf 36,7 Cent pro Kilowattstunde. Im Vergleich mit anderen Stromanbietern ist dieser Preis recht hoch, da es sich um Öko-Strom aus ausschließlich erneuerbaren Energien handelt. Der genutzte Drucker kann eine maximale Leistung von 450 Watt aufbringen, was überdurchschnittlich viel für Drucker im Hobbybereich ist, jedoch nicht selten in der Industrie zu sehen ist. Mit einer relativ geringen Temperatur des Extruders und des Druckbettes wird somit die mittlere Leistungsaufnahme auf 100 Watt geschätzt. Wie sich die Stromkosten errechnen, zeigt die Gleichung 3.7.

$$\text{Stromkosten} = 0,1 \text{ W} \cdot 0,367 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 0,5 \text{ h} = 0,018 \text{ €} \quad (3.7)$$

Im Folgenden wird mit der genannten Durchschnittsleistung und geltendem Strompreis weitergerechnet, wodurch laufende Kosten von 0,0367 €/h für den genutzten Strom entstehen. Weil der Drucker sehr unregelmäßig genutzt wird und auch nicht regelmäßig gewartet wird, werden Instandhaltungskosten und Abschreibungskosten in diesem Fall vernachlässigt. Ebenfalls wird durch diesen Druck kein finanzieller Gewinn gemacht, wodurch Opportunitätskosten entfallen. Dies sind in dem Sinne keine richtigen Kosten, sondern entgangene Gewinne, dadurch, dass der Drucker beispielsweise länger mit einem Druck beschäftigt ist und in der Zeit keine neuen Teile gedruckt werden können. Damit sind die auftretenden Kosten vollständig und können aufaddiert werden in Rechnung 3.8.

$$\text{Kosten gesamt} = 0,194 \text{ €} + 0,018 \text{ €} = 0,213 \text{ €} \quad (3.8)$$

Zum Vergleich kommt folgend der gleiche Druck mit Nutzung von Arc Overhangs anstelle der Supportstrukturen. Ohne die Stützen wiegt das Bauteil nur 5,83 Gramm, also ergeben sich in Rechnung 3.9 folgende Materialkosten:

$$\text{Materialkosten} = 0,00583 \text{ kg} \cdot \frac{25 \text{ €}}{\text{kg}} = 0,146 \text{ €} \quad (3.9)$$

Da der Überhang nun deutlich langsamer gedruckt wird, werden für den gesamten Druck 1,5 Stunden benötigt. Gleichung 3.10 berechnet die Stromkosten.

$$\text{Stromkosten} = 0,0367 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 1,5 \text{ h} = 0,055 \text{ €} \quad (3.10)$$

Die Gesamtkosten sind in Rechnung 3.11 zu sehen:

$$\text{Kosten gesamt} = 0,146 \text{ €} + 0,055 \text{ €} = 0,201 \text{ €} \quad (3.11)$$

Im Vergleich der beiden genutzten Methoden erkennt man in diesem Beispiel nur einen sehr geringen Unterschied von ca. einem Cent oder 5 % der Kosten. Das liegt daran, dass sich das gesparte Supportmaterial mit der dreifach benötigten Zeit ausgleicht. Im folgenden Beispiel wird der Unterschied deutlicher gemacht.

3.8.2 Beispiel 2 – Hobbydruck eines Prüfkörper-ähnlichen Objekts

Um einen deutlichen Unterschied und großen Vorteil der Arc Overhangs zu demonstrieren, wird nun ein neues Druckobjekt unter den gleichen Bedingungen gedruckt. Dieses Modell ist ähnlich aufgebaut, wie der Prüfkörper, nur dass der Turm höher ist und der Überhang nicht zehn Millimeter über dem Boden ist, sondern 50 Millimeter. Wenn der Druck mit Supportmaterial erfolgt, zeigt Abbildung 58 den Aufbau des Drucks.

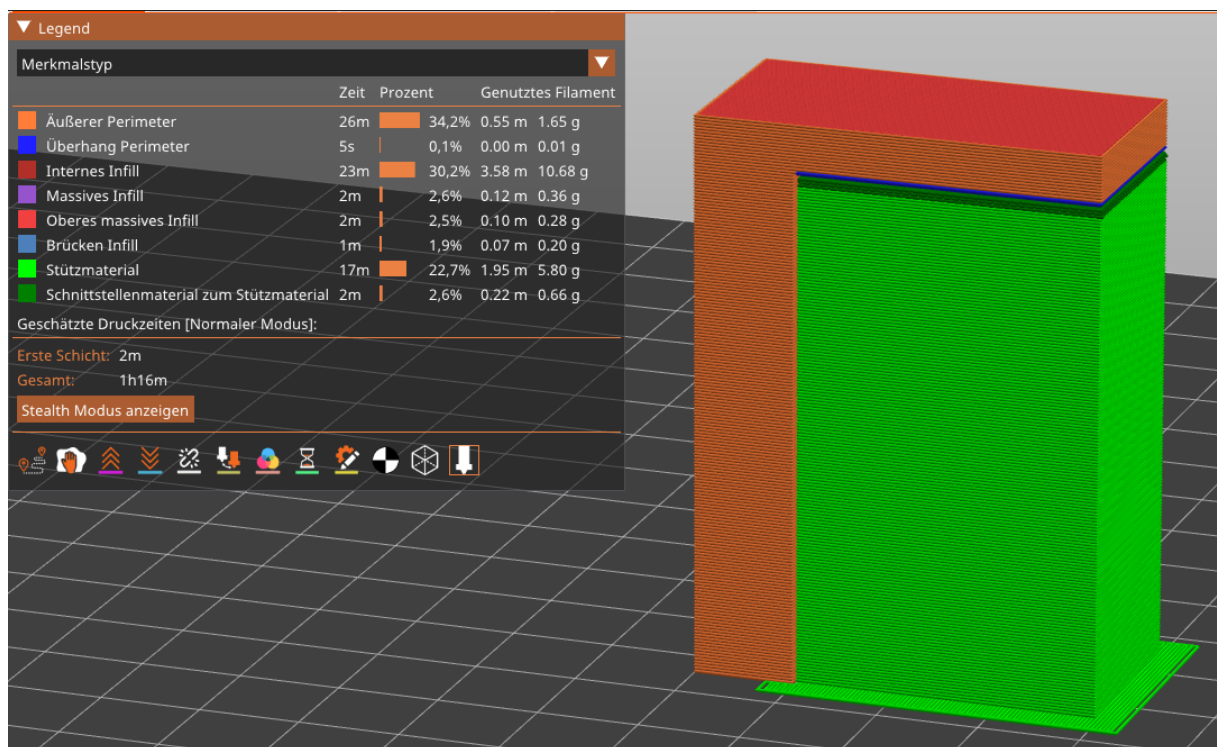


Abbildung 58: Druckbeispiel 2 mit Supportstrukturen

Es ist deutlich zu erkennen, dass erheblich mehr Stützmaterial benötigt wird. Die Rechnung 3.12 zeigt die Materialkosten mit den 19,67 Gramm Filament, die genutzt werden.

$$\text{Materialkosten} = 0,01967 \text{ kg} \cdot \frac{25 \text{ €}}{\text{kg}} = 0,491 \text{ €} \quad (3.12)$$

Die Stromkosten bei einer Druckzeit von 1,25 h berechnen sich, wie Gleichung 3.13 zeigt.

$$\text{Stromkosten} = 0,0367 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 1,25 \text{ h} = 0,046 \text{ €} \quad (3.13)$$

In Rechnung 3.14 werden diese Produkte aufaddiert.

$$\text{Kosten gesamt} = 0,491 \text{ €} + 0,046 \text{ €} = 0,537 \text{ €} \quad (3.14)$$

Für das gleiche Druckobjekt werden beim Druck mit Arc Overhangs ohne Stützen nur 13,20 Gramm Filament genutzt, dafür braucht der Druck jedoch auch zwei Stunden, also fast eine Stunde länger. Gleichungen 3.15 und 3.16 zeigen Material- und Stromkosten, Gleichung 3.17 zeigt die gesamten Kosten für den Druck.

$$\text{Materialkosten} = 0,01320 \text{ kg} \cdot \frac{25 \text{ €}}{\text{kg}} = 0,330 \text{ €} \quad (3.15)$$

$$\text{Stromkosten} = 0,0367 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 2 \text{ h} = 0,073 \text{ €} \quad (3.16)$$

$$\text{Kosten gesamt} = 0,330 \text{ €} + 0,073 \text{ €} = 0,403 \text{ €} \quad (3.17)$$

Hier ist schon ein deutlicherer Preisunterschied von 17,5 Cent vorhanden. Damit kann der Druck mit Arc Overhangs eine Preisersparnis von mehr als 30 % aufweisen. Das kann sehr entscheidend in der Industrie sein, besonders wenn Bauteile in einer hohen Quantität hergestellt werden sollen. Der Preisunterschied ist in diesem Beispiel so deutlich, da mit einem höherliegenden Überhang sehr viel mehr Stützmaterial gedruckt werden muss, was hauptsächlich die Materialkosten und nur geringfügig auch die Stromkosten erhöht. Bei der Nutzung von Arc Overhangs wird zwar noch mehr Zeit benötigt, jedoch ist die zusätzliche Zeit für den Überhang unabhängig von der Überhangshöhe. Hier ist die Überhangsgeometrie entscheidend, da eine große Fläche überaus viel Zeit beansprucht und auch die Form des Überhangs ausschlaggebend für die Druckzeit sein kann. Es wird jedoch kein zusätzliches Material benötigt.

3.8.3 Beispiel 3 – Industriedruck eines Produkts

Um ein Beispiel aus der Industrie zu erbringen, wird in diesem hypothetischen Szenario ein Bauteil gedruckt, das im Anschluss verkauft werden kann. Der Erlös durch das Bauteil beim Verkauf beträgt 200 €. Das Teil wiegt 50 Gramm, benötigt jedoch beim Druck des Überhangs Supportstrukturen, die insgesamt 25 Gramm zusätzlich wiegen. Die Druckzeit beträgt zwei Stunden, jedoch müssen im Anschluss die Supports entfernt werden und die Rückstände davon abgeschliffen werden, damit die Oberflächenqualität in der Qualitätssicherung als gut bezeichnet werden kann. Dieser Prozess dauert eine Stunde. Dafür wird eine Arbeitskraft benötigt, die mit entsprechenden Maschinen für die Nacharbeit zuständig ist. Die anfallenden Kosten für die Arbeitskraft und die genutzten Werkzeuge beträgt 50 € pro Stunde. Weiterhin wird ein besonderes Material genutzt, das überaus stabil und hitzebeständig ist. Das mit Kohlefaser verstärktes Nylonfilament kostet 200 € pro Kilogramm und ist damit ein extrem teures Filament. Dieses Filament erfordert eine Drucktemperatur von 280 °C und eine Druckbetttemperatur von 110 °C. Daher ist mit einem höheren Stromverbrauch zu rechnen, der gemittelt ca. 250 Watt beträgt. Durch den mittelhohen Strompreis von 35 Cent pro Kilowattstunde entstehen Stromkosten von 0,0875 €/h. Der Drucker kostet im Einkauf ca. 10.000 € und hat eine Lebenserwartung von 10 Jahren bei einem täglichen Gebrauch von 6 Stunden.

Die Gleichung 3.18 zeigt die entstehenden Materialkosten:

$$\text{Materialkosten} = 0,075 \text{ kg} \cdot \frac{200 \text{ €}}{\text{kg}} = 15 \text{ €} \quad (3.18)$$

Der Strompreis ist in Gleichung 3.19 zu erkennen.

$$\text{Stromkosten} = 0,0875 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 2 \text{ h} = 0,175 \text{ €} \quad (3.19)$$

Dazu kommen noch die Abschreibungskosten, die sich in Gleichungen 3.20 und 3.21 errechnen.

$$\text{Stündliche Abschreibungskosten} = \frac{10.000 \text{ €}}{10 \cdot 365 \cdot 6 \text{ h}} = 0,457 \frac{\text{€}}{\text{h}} \quad (3.20)$$

$$\text{Abschreibungskosten} = 0,457 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 2 \text{ h} = 0,914 \text{ €} \quad (2.21)$$

Die Instandhaltungskosten in Gleichung 2.22 sind dementsprechend 10 % davon:

$$\text{Instandhaltungskosten} = 0,1 \cdot 0,914 \text{ €} = 0,091 \text{ €} \quad (2.22)$$

Insgesamt erschließen sich in Gleichung 2.23 die gesamten Kosten.

$$\text{Kosten gesamt} = 15 \text{ €} + 0,175 \text{ €} + 0,914 \text{ €} + 0,091 \text{ €} = 16,18 \text{ €} \quad (2.23)$$

Nun ist ebenfalls noch die Produktionsstrategie für die Entscheidung wichtig. Wenn der Druck zwei Stunden braucht und die Nachbearbeitung eine Stunde ausfüllt, könnte eine hundertprozentige Auslastung mit zwei Druckern erreicht werden, die verzögert und parallel drucken. So könnte jeder Druck um eine Stunde zeitversetzt beginnen und jede Stunde würde ein Druck fertiggestellt werden. Dieser kann dann eine Stunde lang bearbeitet werden, bis dann der nächste Druck fertig ist. So kann in zwei Stunden ein Erlös von 400 € mit zwei fertiggestellten Bauteilen erzielt werden. Bei jedem Druck werden 16,18 € für das Material und andere laufende Kosten benötigt und ebenfalls fallen 50 € pro Druck für die Nachbearbeitung an. So entsteht eine stündliche Bilanz, die in Gleichung 2.24 gezeigt wird.

$$\text{Gewinn} = \frac{2 \cdot (200 \text{ €} - 16,18 \text{ €} - 50 \text{ €})}{2 \text{ h}} = 133,82 \frac{\text{€}}{\text{h}} \quad (2.24)$$

Nun wird der Vergleich herangezogen, in dem das gleiche Druckobjekt ohne Stützen, aber mit Arc Overhang gedruckt wird. Es gelten die gleichen Umstände, nur dass der Druck jetzt 5 Stunden dauert und bei erfolgreich gedruckten Arc Overhangs nur eine Nachbearbeitungszeit von 12 Minuten (= 0,2 h) eingerechnet wird. Gleichung 2.25 drückt die komplette Rechnung der Kosten aus:

$$\text{Kosten gesamt} = 0,05 \text{ kg} \cdot \frac{200 \text{ €}}{\text{kg}} + 5 \text{ h} \cdot (0,0875 + 0,457 + 0,046) \frac{\text{€}}{\text{h}} = 12,95 \text{ €} \quad (2.25)$$

Davon sind 10 € Materialkosten. Es ist hier erneut ein deutlicher Preisunterschied zu erkennen, der auch bei einer viel längeren Druckzeit vorteilhaft für die Nutzung von Arc Overhangs ausfällt. Ausschlaggebend sind hier trotz der zusätzlichen zeitabhängigen Kosten die Materialkosten, aufgrund des teuren Filaments. Interessant zu betrachten ist noch die Produktionstaktung. Bei einer Arbeitskraft und zwei Druckern können die Drucke mit einem zeitlichen Versatz von 12 Minuten gestartet werden. So werden alle 5 Stunden zwei Drucke fertiggestellt. Der Gewinn ist in Gleichung 2.26 berechnet.

$$\text{Gewinn} = \frac{2 \cdot (200 \text{ €} - 12,95 \text{ €}) - 5 \cdot 50 \text{ €}}{5 \text{ h}} = 24,82 \frac{\text{€}}{\text{h}} \quad (2.26)$$

Das ist deutlich weniger als die 133,82 €/h, die in dem Modell mit Supportmaterial entstehen. Das liegt im Wesentlichen an der geringen Auslastung der Arbeitskraft, die in den 5 Stunden nur 24 Minuten effektiv arbeitet und den Rest der Zeit wartet, wofür aber

dennoch Kosten entstehen. Selbst, wenn nur die tatsächliche Arbeitszeit bezahlt werden soll, entsteht nur ein stündlicher Gewinn von 70,82 €/h. Der Grund hierfür sind die hohen Opportunitätskosten. Das Bauteil kann für einen hohen Preis von 200 € verkauft werden und das passiert im ersten Fall mit Supports jede Stunde. Bei der Nutzung von Arc Overhangs können alle 5 Stunden zwei Bauteile verkauft werden, was nur einen stündlichen Erlös von 80 € bringt. Wenn der Drucker länger für ein Bauteil braucht, um laufende Kosten zu reduzieren, wird dabei eben auch der laufende Erlös erheblich reduziert. Es bietet sich jedoch folgende Optimierung an: Für eine höhere Produktionsrate müssen nur zusätzliche Drucker angeschafft werden, ohne dass weitere Arbeitskräfte nötig sind. Da die Druckzeit 25-mal länger ist als die manuelle Bearbeitungszeit, können mit 25 Drucker parallel arbeiten, ohne den Bedarf an zusätzlichem Personal. Mit dieser Druckeranzahl und einem zeitlichen Versatz von 12 Minuten pro Druck ist die Arbeitskraft zu 100 % ausgelastet und es können in 5 Stunden 25 Bauteile fertiggestellt werden. Der Gewinn berechnet sich in Gleichung 2.27:

$$\text{Gewinn} = \frac{25 \cdot (200 \text{ €} - 12,95 \text{ €}) - 5 \cdot 50 \text{ €}}{5 \text{ h}} = 885,25 \frac{\text{€}}{\text{h}} \quad (2.27)$$

Das ist wiederum deutlich höher als der Gewinn beim Druck mit Stützen. Auch bei hohen Personalkosten oder großem Fachkräftemangel ist somit der Druck mit Arc Overhangs attraktiv. Wenn das Bauteil mit Stützen gedruckt wird, werden für eine höhere Fertigungsrate nicht nur mehr Drucker, sondern auch mehr Personal benötigt. Pro Fachkraft könnten zwei Drucker parallel drucken. Um auf einen gleichen stündlichen Umsatz wie in Gleichung 2.27 zu kommen sind 10 Drucker und 5 Mitarbeiter nötig, die ebenfalls 5 Teile pro Stunde fertigstellen können. Das reduziert jedoch den Gewinn auf 669,10 €/h. Für einen höheren Gewinn werden mindestens 14 Drucker und 7 Fachkräfte benötigt, die dann 936,74 €/h Gewinn erzielen.

Wie diese Beispiele zeigen, ist die Entscheidung für oder gegen die Nutzung von Arc Overhangs nicht immer eindeutig. Viele Faktoren entscheiden über die Sinnhaftigkeit der Methoden. Unterschiedliche Szenarien bringen auch unterschiedliche Gewichtungungen in diese Faktoren und können sich mehr oder weniger stark auf die Kosten und den Gewinn auswirken. Außerdem sind Einzelheiten der Unternehmensstrategie zu berücksichtigen. Das schließt ein, wie viele Mitarbeiter ein Unternehmen in dem Bereich einstellen möchte oder kann, welche Maschinen und Drucker zur Verfügung stehen und auch wie viel Platz gegeben ist. Es kann ausschlaggebend sein, welche Anforderungen in der Qualität erfüllt werden müssen und wie stark die zeitlichen Beschränkungen beispielsweise durch einzuhaltende Lieferzeiten sind. All das muss betrachtet werden, bevor entschieden werden kann, welche Methode gewählt wird.

Nun sind häufig nicht nur die entstehenden Kosten, sondern auch Faktoren, wie die Qualität und Nachhaltigkeit wichtig. Die Qualität bei Arc Overhangs wird zwar ständig verbessert, es sind aber noch viele Forschungen nötig, um die Qualität zu erreichen, die für normale Drucke als Standard gilt. Natürlich hatte die neue Technologie noch nicht viel Entwicklungszeit. Der aktuelle Stand, mit dem heute Drucke angefertigt werden, benötigte Jahrzehnte. Der Fortschritt bei Arc Overhangs wird wohl sehr viel schneller sein. In der Nachhaltigkeit punktet die neue Methode natürlich mit der teilweise erheblichen Materialreduktion. Zwar kommt im Gegenzug auch ein höherer Stromverbrauch dazu, der jedoch mit einem Wechsel auf erneuerbare Energien

ausgeglichen werden kann. Die sind im Schnitt teurer pro Kilowattstunde, was aber in den meisten Fällen kein Unterschied macht, da die Materialkosten fast in allen Fällen die Stromkosten übersteigen. Es müsste eine Kombination von günstigem Filament, hohen Strompreisen und sehr langsamen Druckgeschwindigkeiten gegeben sein, damit der stündliche Strompreis den stündlichen Materialpreis überschreitet. So werden in den meisten Fällen die höheren Stromkosten wieder ausgeglichen. Nach ausgiebiger Recherche ist nicht ersichtlich, wie viel elektrische Energie für die Herstellung des PLA-Filaments notwendig ist, jedoch ist dies ein wahrscheinlich nicht unerheblicher Teil. Ebenfalls kann bei der Herstellung CO₂ freigesetzt werden oder es sind andere umweltschädigende Prozesse nötig. Auch wenn öffentlich zugängliche Informationen zur PLA-Herstellung begrenzt sind, ist es dennoch wichtig, Filament sparsam zu verwenden, um die Nachhaltigkeit zu verbessern.

3.9 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Wie das vorherige Kapitel schon zeigte, müssen bei der Abwägung der Arc Overhangs viele Faktoren beachtet werden. Auch hier ist wichtig anzumerken, dass jeder Anwendungsfall mit neuen Umständen kommt, die sich unterschiedlich auf die Entscheidung auswirken können. Es ist ratsam, sich ausgiebig Gedanken zu dem Thema zu machen und bei einer möglichen Nutzung der Arc Overhangs zuvor eine Kostenanalyse durchzuführen, um den finanziellen Nutzen zu bestimmen. Weiterhin kann eine solche Produktion theoretisch geplant oder simuliert werden, um auf mögliche Probleme so früh wie möglich zu stoßen. Zuletzt sollte eine kleinere Testreihe der Produktion mit den neuen Überhängen gestartet werden, die eine höhere Quantität aussagekräftig widerspiegelt. Erst dann kann bei positiven Rückmeldungen über einen ausreichenden Zeitraum eine industrielle Herstellung von Teilen entsprechend angepasst werden.

Somit ist der finanzielle Aspekt relativ gut und objektiv zu beurteilen. Der qualitative Einfluss der Methode ist weniger eindeutig bestimmbar. Da in den beschriebenen Tests und Versuchsreihen viele Schlüsse gezogen werden können, kann somit zwar ein Fortschritt in dem verhältnismäßig neuen Thema festgestellt werden, jedoch ist diese Druckmethode aktuell nicht konkurrenzfähig zum standardmäßigen Druck. Es fehlen weitere Testreihen, Parameterstudien und zuletzt eine Implementierung in einer funktionstüchtigen Slicing-Software mit den erweiterten Parametereinstellungen des Post Processing Scripts. Dazu sind ausführlichere Studien über einen längeren Zeitraum nötig, die einen solchen Fortschritt bereitstellen können. Besonders Verformungen, die sich als Warping abzeichnen, sowie das Absacken vom Überhang bei zu viel Hitzeeinfluss sind Probleme, die im industriellen Gebrauch nicht vorkommen dürfen.

Prognosen über den zukünftigen Verlauf der Thematik sind nur grob zu treffen. Mit der vergangenen Entwicklung der letzten zwei Jahre sind jedoch in den nächsten zwei Jahren einige weitere Fortschritte zu erwarten. Diese können entweder in Form von wissenschaftlichen Studien, studentischen Arbeiten oder Nachforschungen von privaten Personen in ihrer Freizeit erfolgen. Jegliche Forschung in dem Themengebiet hat positive Auswirkungen, da aus fast allen Tests Erkenntnisse gezogen werden

können oder bereits bestehende Theorien belegt oder widerlegt werden können. Somit kann weiterhin jede Person, die sich mit dem Thema auseinander setzt, einen Teil zum Fortschritt der Arc Overhangs betragen.

4 Auswertung und Fazit

4.1 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

In dieser Arbeit wurden die technischen sowie wirtschaftlichen Aspekte von Arc Overhangs im 3D-Druck eingehend untersucht, um deren Potenzial in der additiven Fertigung zu bewerten. Die Arc Overhangs-Technik wurde als vielversprechende Methode identifiziert, um waagerechte Überhänge ohne zusätzliche Stützstrukturen zu drucken. Dies bietet Vorteile hinsichtlich Materialeinsparung, jedoch auch Nachteile bezogen auf die benötigte Druckzeit.

Die durchgeführte Parameterstudie zeigt, dass durch die präzise Anpassung von Druckparametern wie Temperatur, Infill und Geschwindigkeiten stabile Arc Overhangs möglich sind, die bis zu einem gewissen Grad entsprechende Qualitätsmerkmale erfüllen können. Für den optimalen Parametersatz ist eine feine Balance der einzelnen Variablen notwendig, da teilweise schon kleine Veränderungen zwischen einem erfolgreichen und einem fehlgeschlagenen Druck entscheiden können.

Weitere Ideen, um eine noch bessere Qualität zu gewährleisten, können als Grundlage für weitere Forschungen an dem Thema Anhaltspunkte bieten. Außerdem sind in Zukunft noch mehrere Varianten bezüglich anderer Drucker, Filamente und Prüfkörpern zu untersuchen.

4.2 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass der Einsatz von Arc Overhangs, trotz der längeren Druckzeiten, in vielen industriellen Situationen ökologisch und ökonomisch sinnvoll sein kann. Die Reduktion des Materialeinsatzes durch Einsparungen der Stützstrukturen senkt in vielen Fällen die entstehenden Kosten, selbst bei längerem Zeitaufwand und dadurch entstehenden Stromkosten.

In Beispielen wird deutlich, dass der Nutzen der Arc Overhangs besonders bemerkbar ist, wenn ein Filament mit hohen Anschaffungskosten genutzt wird oder der betrachtete Überhang sich sehr weit oben im Bauteil befindet, weil dann mehr Supportmaterial gedruckt werden muss. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Entscheidungsfindung soll im Designprozess und in der Produktionsplanung die Wahl von Arc Overhangs erleichtern und könnte in verschiedenen Branchen anwendbar sein. Jedoch ist für jede Situation ein eigenes Gutachten zu erstellen, das alle beeinflussenden Umstände berücksichtigt, da nur so eine aussagekräftige Entscheidung getroffen werden kann.

4.3 Fazit und Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente und Auswertungen zeigen, dass Arc Overhangs aktuell im kleinen Maßstab eine durchaus relevante Alternative zu Stützen darstellen. Auch eine hybride Kombination von nur wenig Support an kritischen

Punkten und Arc Overhangs hat mit einer höheren statischen Stabilität Potenzial. Industriell ist dieses Konzept jedoch noch nicht konkurrenzfähig und kann noch keine ausreichende Konstanz bezüglich der Qualität und Stabilität aufweisen, die den Ansprüchen großer Unternehmen entspricht. Die durchgeführte Parameterstudie und das entwickelte Entscheidungsmodell bieten eine Grundlage, um diese neue Technologie gezielt und anwendungsspezifisch weiter zu optimieren.

Zukünftige Forschungsarbeiten können sich auf die Verbesserung der Stabilität und Druckgeschwindigkeit der Arc Overhangs fokussieren, um deren Anwendung bei höherer Quantität zu erleichtern.

5 Quellen

- [1] 3DWithUs: Best Conveyor Belt 3D Printers 2024 <https://3dwithus.com/conveyor-belt-3d-printers>
- [2] Andreas: Wie man die Kosten für einen FDM 3D-Druck berechnet [https://addis-techblog.de/2024/01/wie-man-die-kosten-fuer-einen-fdm-3d-druck-berechnet/#Wartungs- und Reparaturkosten](https://addis-techblog.de/2024/01/wie-man-die-kosten-fuer-einen-fdm-3d-druck-berechnet/#Wartungs-und-Reparaturkosten)
- [3] habberlabber: Made a “infill type display” using modifier meshes in PrusaSlicer. Don’t see the use for most of the options. But it looks cool!
https://www.reddit.com/r/prusa3d/comments/evtbp1/made_a_infill_type_display_using_modifier_meshes/#lightbox
- [4] Hermann, S.: NON-PLANAR 3D Printing by BENDING G-Code
<https://www.youtube.com/watch?v=0XaaUXOwzTs>
- [5] Hermann, S.: Impressive 4-Axis Non-Planar 3D Printing
<https://www.youtube.com/watch?v=7LRWuccMGjc&t=2s>
- [6] J., J.: Warping - What is it, why does it happen, how to avoid it?
<https://www.hta3d.com/en/blog/warping-what-is-it-why-does-it-happen-how-to-avoid-it>
- [7] Kondo, H.: 3D Printing Overhang: How to 3D Print Overhangs
<https://all3dp.com/2/3d-printing-overhang-how-to-master-overhangs-exceeding-45/>
- [8] Marcel: ABS Filament <https://einfach3ddruck.de/abs-filament-im-3d-druck/>
- [9] Marcel: PLA Filament <https://einfach3ddruck.de/pla-filament-im-3d-druck/>
- [10] Martinez, J.: Warping of bottom of print
<https://3dprinting.stackexchange.com/questions/5234/warping-of-bottom-of-print>
- [11] McCulloch, S.: arc-overhang <https://github.com/stmcculloch/arc-overhang>
- [12] Maurizio: 3D DRUCK STROMKOSTEN | 5 Drucker im Vergleich!
(Stromverbrauch 2022) <https://www.youtube.com/watch?v=c1qjPLyMZHE>
- [13] O. Verf.: Design- und Materialoptimierung durch 3D-Druck
<https://www.tcw.de/news/design-und-materialoptimierung-durch-3d-druck-991>
- [14] O. Verf.: Fünf einfache Methoden zum Entfernen von Supportstrukturen
<https://www.materialise.com/de/inspiration/artikel/funf-einfache-methoden-zum-entfernen-von-supportstrukturen>
- [15] O. Verf.: ZHAW-Masterstudenten entwickeln neuartigen 3D-Drucker
<https://www.zhaw.ch/de/ueber-uns/aktuell/news/detailansicht-news/event-news/zhaw-masterstudenten-entwickeln-neuartigen-3d-drucker/>
- [16] O. Verf.: Upgrade für den 3D-Drucker spart Zeit und Stützmaterial
<https://www.zhaw.ch/de/ueber-uns/aktuell/news/detailansicht-news/event-news/upgrade-fuer-den-3d-drucker-spart-zeit-und-stuetzmaterial/>
- [17] O. Verf.: 3D-Printed Hilbert Curve Absorbers <https://mpetroff.net/2018/08/3d-printed-hilbert-curve-absorbers/>
- [18] O. Verf.: How to improve the surface quality of overhangs
<https://support.bcn3d.com/knowledge/improve-overhangs>
- [19] O. Verf.: General info https://help.prusa3d.com/article/general-info_1910
- [20] O. Verf.: About <https://slic3r.org/about/>
- [21] O. Verf.: Slic3r <https://de.wikipedia.org/wiki/Slic3r>

- [22] O. Verf.: QIDI Tech X-Max 3D Printer <https://www.3dprintlife.com/qidi-x-max>
- [23] O. Verf.: PLA-Filament Wiki – Das große 3D-Druck-Kompendium zu PLA <https://www.3d-grenzenlos.de/pla-filament/>
- [24] O. Verf.: Wie funktionieren Wärmebildkameras? <https://www.fluke.com/de-de/mehr-erfahren/blog/thermografie/wie-funktionieren-waermebildkameras#:~:text=Eine%20W%C3%A4rmebildkamera%20erkennt%20und%20misst,des%20zu%20messenden%20Gegenstands%20darstellt.>
- [25] O. Verf.: Ökostrom für uns - für Lüneburg, für die Region, für alle <https://xn--lnestrom-65a.de/tarife-oekostrom.html>
- [26] O. Verf.: 3DXTech – CarbonX – Carbon-Nylon (PA 12 + CF) Filament – Schwarz – 1.75 mm – 0,5 kg https://filamentworld.de/shop/special-filament/hochtemperatur-filament/3dxtech-carbonx-carbon-nylon-pa-12-filament-schwarz-1-75/?utm_source=Google+Shopping&utm_campaign=Google+Feed&utm_medium=cpc&utm_term=116870
- [27] O. Verf.: QIDI TECH X-Max 3D-Drucker Großformat 300x250x300mm <https://www.geekmaxi.com/de/3d-drucker-qidi-tech-x-max-3d-drucker-grossformat-300x250x300mm-1870.html>
- [28] O. Verf.: DoE - Statistische Versuchsplanung https://www.mt.com/de/de/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/design-of-experiments-doe.html
- [29] O. Verf.: What is DOE? Design of Experiments Basics for Beginners <https://www.sartorius.com/en/knowledge/science-snippets/what-is-doe-design-of-experiments-basics-for-beginners-507170>
- [30] O. Verf.: eSUN PLA+ Filament 1.75mm, 3D Drucker Filament PLA Plus, Maßgenauigkeit +/- 0.03mm, 1kg Spule (2.2 LBS) , 3D Drucker, Kaltes Weiß https://www.amazon.de/dp/B07FQ98RNP?ref=nb_sb_ss_w_as-reorder_k0_1_4&=&crd=7D7Y6ORBR88U&=&srefix=pla+
- [31] Remy: So drucken Sie – PLA https://formfutura-com.translate.goog/blog/how-to-print-pla/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=rq#:~:text=Slicer%20setting%20for%20PLA&text=Temperature%3A%20Aim%20for%20a%20printing,it's%20recommended%20for%20consistent%20performance
- [32] S., R.: Welche FDM Drucker Typen gibt es? <https://www.3dnatives.com/de/typen-fdm-drucker-310520171/#>
- [33] Sommer, E.: PLA-Drucktemperatur: Die besten Einstellungen <https://all3dp.com/de/2/pla-drucktemperatur-druckbett-hotend-einstellungen/>
- [34] Telgkamp, J.: Additive Fertigung Vorlesungsfolien 2023
- [35] TheTurtleVirus: Does Hilbert Curve infill suppress warping? https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/ws1wvh/does_hilbert_curve_infill_suppress_warping/
- [36] van Maanen, R.: SuperPleccer <https://github.com/rvmn/SuperPleccer/commits/master/README.md>
- [37] van Maanen, R.: SuperPleccer Readme <https://github.com/rvmn/SuperPleccer/blob/master/README.md>
- [38] van Maanen, R.: Overview <https://github.com/rvmn>
- [39] Wachenschwan, N.: Overview <https://github.com/nicolai-wachenschwan>

- [40] Wachenschwan, N.: commits <https://github.com/nicolai-wachenschwan/arc-overhang-prusaslicer-integration/commits/main/README.md>
- [41] Wachenschwan, N.: Readme arc-overhang-prusa-integration <https://github.com/nicolai-wachenschwan/arc-overhang-prusaslicer-integration>
- [42] Waylinl: How to Fix Warping in 3D Printing <https://qidi3d.com/blogs/news/fix-3d-printing-warping-guide>
- [43] Warnings: ABS warp <https://forum.prusa3d.com/forum/original-prusa-i3-mk2-s-general-discussion-announcements-and-releases/abs-warp/?language=de>
- [44] Wikifactory: Ultimate Guide: How to design for 3D Printing <https://wikifactory.com/+wikifactory/stories/ultimate-guide-how-to-design-for-3d-printing>